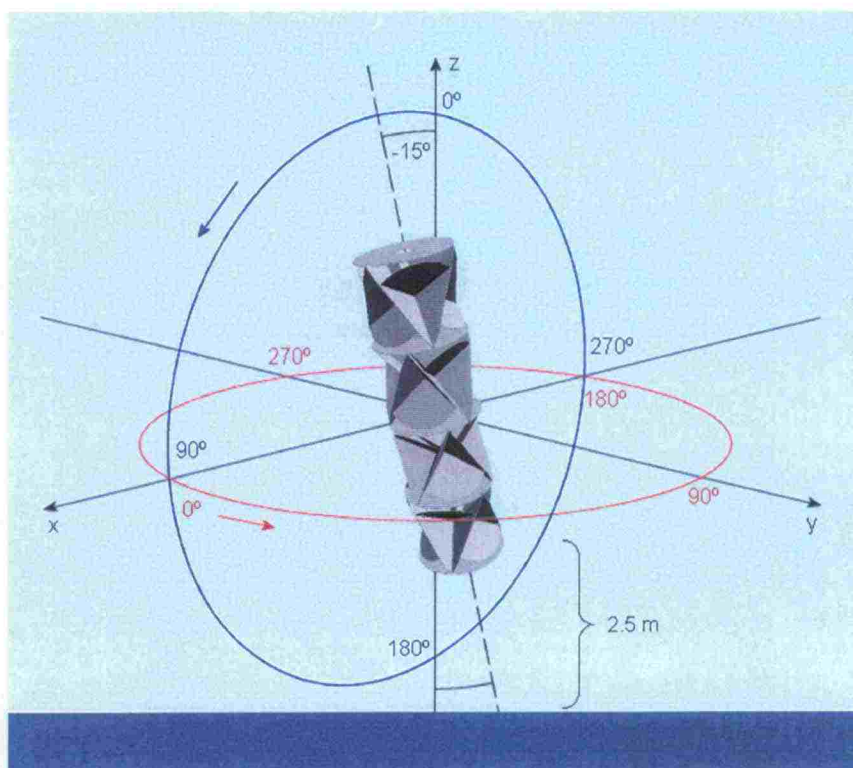


# VIITOISSA KÄYTETTÄVÄT TUTKAHEIJASTIMET

## Tutkavasteiden laskenta ja analysointi



Helsinki 2004

ISSN 1456 - 9442

Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri)		Julkaisun laji	
VTT Tietotekniikka		Merenkulkulaitoksen sisäisiä julkaisuja	
W. Backman, A. Hujanen, S. Horsmanheimo		Toimeksiantaja	
		Merenkulkulaitos, R. Joro/Viittatehdas J-P Ollaranta	
Tutkimus tutkapoikkipinta-alan teoriasta		Toimielimen asettamispäivämäärä	
		15.5.2004	
Julkaisun nimi			
VIITOISSA KÄYTETTÄVÄT TUTKAHEIJASIMET, Tutkavasteiden laskenta ja analysointi			
Tiivistelmä			
<p>Tässä raportissa esitetään VTT Tietotekniikalta tilatun tutkaheijastimien analysointiprojektin tulokset. Projektissa tutkittiin Merenkulkulaitoksen viittatehtaan kehittämien tutkaheijastimien ominaisuuksia VTT:llä kehitetyllä CAST -laskentaohjelmistolla. Ohjelmisto on toteutettu ensisijaisesti laivamallien tutkapoikkipinnan (RCS, radar cross section) laskentaan, mutta sitä voidaan suoraan hyödyntää myös muiden kolmiulotteisten kohteiden laskennassa. Laskentaohjelmistossa kohdetta valaistiin tasoaallolla, jolle laskettiin kohteen pinnasta tapahtuvat moninkertaiset heijastukset sekä kohteen terävistä särmistä tapahtuva diffraktio. Heijastuksien laskennassa hyödynnettiin VTT:llä kehitettyä APO (Antenna theory applied to Physical Optics) -menetelmää ja diffraktion laskennassa PTD (Physical Theory of Diffraction) -menetelmää. APO-menetelmässä kohteen pinnalla tutka-aallolle tapahtuvat moninkertaiset heijastukset huomioitiin geometrisen optiikan avulla.</p> <p>Viittatehtaan toimittamista tutkaheijastimista toteutettiin kolmiulotteiset CAD-mallit. Niissä soppielementit mallinnettiin identtisinä, mutta todellisuudessa VTT:lle toimitetuissa koekappaleissa esiintyi jonkin verran virhetoleranssia soppielementtien asennoissa, suunnissa ja muodoissa.</p> <p>Analyysissa on rajoituttu tutkimaan vain vaakapolarisaatiota, koska aallokon vaikutus siihen on pienempi kuin pystypolarisaatioon. Laskennat eri heijastimille suoritettiin sekä vedenpinnan kanssa että ilman. Tapauksissa, joissa vedenpintaa ei otettu huomioon, tasoaalto saapui 90° kulmassa tutkaheijastimeen. Vedenpinnan tapauksessa tasoaalto saapui kohteeseen hiukan vinosti, 89.5° kulmassa, jolloin tulevan aallon heijastus vedenpinnasta ennen tutkaheijastinta voitiin mallintaa. Diffraktiovaikutus laskettiin PTD-menetelmällä.</p> <p>Tehdyn tutkimuksen perusteella kaikki soppiyhmät toimivat hyvin pystyasennossa. Soppiyhmien takaisinsironnassa on toki eroja, mutta ne selittyvät pääosin soppiyhmien kokoeroista. Kallistuskulmaherkkyyden osalta vaihtelu on suurempaa. Pääsääntönä voidaan todeta, että soppiyhmä on sitä herkempi kallistelulle mitä enemmän soppielementtejä on asetettu päällekkäin. Tämä johtuu siitä, että soppiyhmä alkaa toimia antenniryhmänä, jonka sirontakuvio helposti liuskoittuu ts. sisältää paljon minimikohtia.</p>			
Avainsanat (asiasanat)			
Tutkapoikkipinta-ala, fysikaalinen ja geometrinen optiikka, diffraktio sähkömagneettinen tasoaalto, sironta.			
Muut tiedot			
Sarjan nimi ja numero		ISSN	ISBN
Merenkulkulaitoksen julkaisuja 08 / 2004		1456 - 9442	
Kokonaissivumäärä	Kieli	Hinta	Luottamuksellisuus
2 + 40	Suomi		
Jakaja		Kustantaja	

# Sisällysluettelo

Sisällysluettelo.....	i
1 Johdanto .....	2
2 Laskentatapa.....	2
3 Tulokset ja tulosten tarkastelu.....	4
3.1 Diffraction vaikutus .....	4
3.2 Soppiryhmien vertailua .....	5
3.2.1 Tutkaheijastin pystyasennossa .....	5
3.2.2 Asennuskorkeuden vaikutus .....	8
3.2.3 Kallistuserkkyys.....	9
3.3 Yksittäisten tutkaheijastimien tulokset.....	13
3.3.1 CAD-mallinnuksen aikana tehtyjä havaintoja .....	13
3.3.2 Tutkaheijastin 1.....	14
3.3.3 Tutkaheijastin 2.....	17
3.3.4 Tutkaheijastin 3.....	20
3.3.5 Tutkaheijastin 5.....	23
3.3.6 Tutkaheijastin 6.....	26
3.3.7 Tutkaheijastin 7 - styroksipäällysteinen.....	29
3.3.8 Tutkaheijastin 8 - styroksipäällysteinen.....	32
3.3.9 Tutkaheijastin 9.....	35
4 Yhteenveto .....	38
Lähdeluettelo .....	39
Liitteet .....	Virhe. Kirjanmerk



# 1 Johdanto

Tässä raportissa esitetään Merenkulkulaitoksen tilaaman tutkaheijastimien analysointiprojektin tulokset. Projektissa tutkittiin Viittatehtaan kehittämien tutkaheijastimien ominaisuuksia VTT:llä kehitetyllä laskentaohjelmistolla [1], jota on kehitetty vuodesta 1999 lähtien yhdessä Merivoimien Tutkimuslaitoksen kanssa. Ohjelmisto on toteutettu ensisijaisesti laivamallien tutkapoikkipinnan laskentaan, mutta sitä voidaan suoraan hyödyntää myös muiden kolmiulotteisten kohteiden laskennassa. Laskentaohjelmistossa kohdetta valaistaan tasoaallolla, jolle lasketaan kohteen pinnasta tapahtuvat moninkertaiset heijastukset sekä kohteen terävistä särmistä tapahtuva diffraktio. Heijastuksien laskennassa hyödynnetään VTT:llä kehitettyä APO (Antenna theory applied to Physical Optics) -menetelmää [2] ja diffraktion laskennassa PTD (Physical Theory of Diffraction) -menetelmää [3]. APO-menetelmässä kohteen pinnalla tutka-aallolle tapahtuvat moninkertaiset heijastukset huomioidaan geometrisen optiikan avulla.

Ohjelmiston laskentamenetelmät on verifioitu Matine-hankkeissa yksinkertaisilla kappaleilla, joiden tutkapoikkipinta on tarkasti laskettavissa. Tässä raportissa esitettävissä tuloksissa saattaa esiintyä tietyissä tapauksissa virhettä johtuen siitä, että fysikaalinen optiikka on approksimatiivinen, vedenpinnasta tapahtuva heijastus on laskentamallissa yksinkertaistettu ja diffraktiossa huomioidaan vain ensimmäisen kertaluvun tapaus.

## 2 Laskentatapa

Viittatehtaan toimittamista tutkaheijastimista on toteutettu kolmiulotteiset CAD-mallit. Niissä soppielementit mallitetaan identtisinä, mutta todellisuudessa VTT:lle toimitetuissa koekappaleissa esiintyy virhetoleranssia soppielementtien asennoissa, suunnissa ja muodoissa.

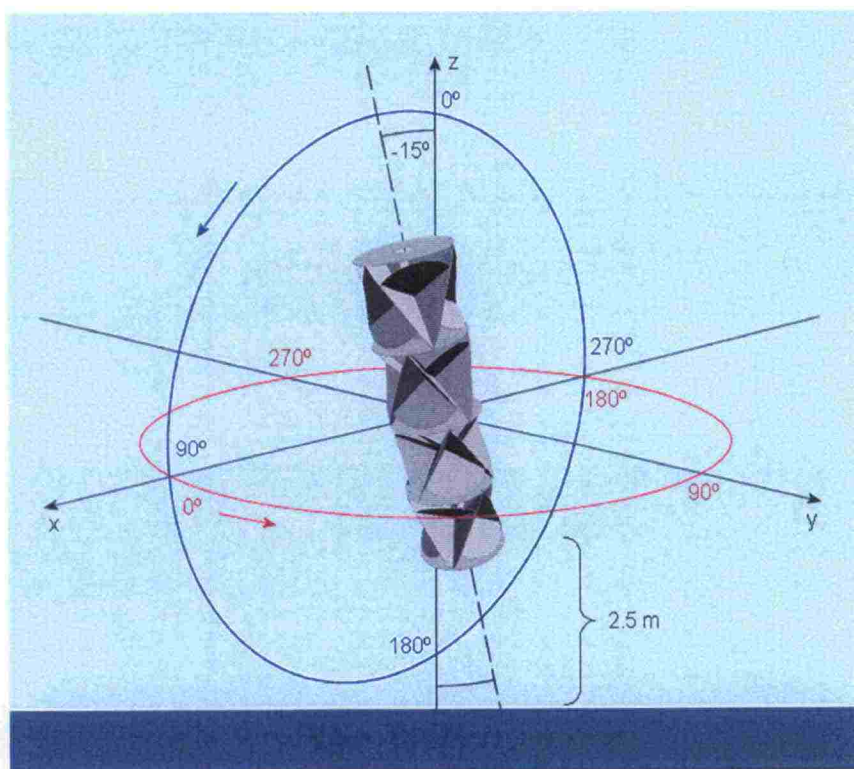
Analyysissa on rajoitettu tutkimaan vain vaakapolarisaatiota, koska aallokon vaikutus siihen on pienempi kuin pystypolarisaatioon. Laskennat eri heijastimille on suoritettu sekä vedenpinnan kanssa että ilman. Tapauksissa, joissa vedenpintaa ei oteta huomioon, tasoaalto saapuu  $90^\circ$  kulmassa tutkaheijastimeen. Vedenpinnan tapauksessa tasoaalto saapuu kohteeseen hiukan vinosti,  $89.5^\circ$  kulmassa, jolloin tulevan aallon heijastus vedenpinnasta ennen tutkaheijastinta voidaan mallintaa. Diffraktiovaikutus on laskettu PTD-menetelmällä vain tietyissä tutkaheijastimien asennoissa, koska sen vaikutus laskenta-aikaan on merkittävä. Tutkaheijastimen laskentakorkeudet merenpinnasta pienien tutkaheijastimien (TH1, TH2, TH3, TH7, TH8 ja TH9) tapauksissa ovat 2.5 m ja 4 m, ja isojen (TH5 ja TH6) 4 m ja 6 m. Etäisyys tasoaaltolähteen ja soppiryhmän välillä on 2 km. Soppien materiaali on terästä, mikä on mallinnettu laskentaohjelmistossa täydellisesti heijastavalla pinnoitemateriaalilla. Laskennassa käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 1.



Taulukko 1. Laskennassa käytetyt parametrit.

Parametri	Arvoalue
Taajuus	3 ja 9 GHz
Theta-kulma (kiertää kohteen ylhäältä alas)	89.5°, 90° tai pystypyyhkäisyssä 0° - 360°
Phi-kulma (kiertää kohteen vastapäivään horisontaalitasossa)	0° tai vaakapyyhkäisyssä 0° - 360°
Polarisaatio	Vaakapolarisaatio
Kallistus	0°, 15° (taaksepäin) ja -15° (eteenpäin)
Alareunan etäisyys merenpinnasta	2.5, 4 tai 6 m
Etäisyys kohteesta	2 km

Analyysissä käytetty koordinaatisto on määritelty kuvan 1 mukaisesti.

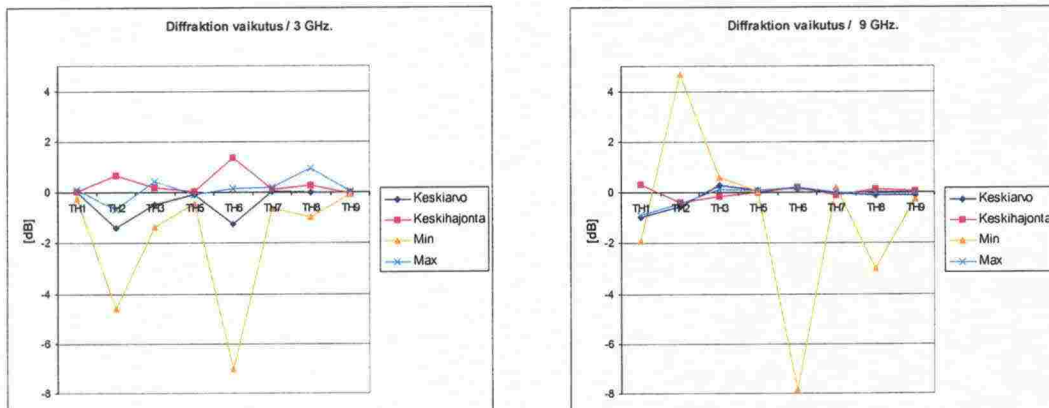


Kuva 1. CAST-ohjelmiston koordinaatisto, kiertosuunnat ja kallistuskulma.

## 3 Tulokset ja tulosten tarkastelu

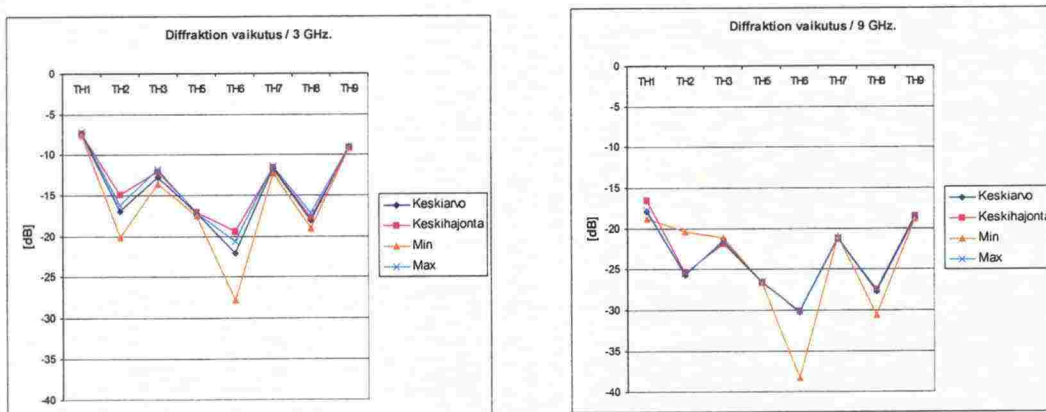
### 3.1 Diffraaktion vaikutus

Ennen tutkaheijastimien vertailua selvitettiin, kannattaako diffraktiovaikutus huomioida tutkaheijastimien välisessä vertailuissa, koska terävien, diffraktoivien särmien määrä ja geometria eivät merkittävästi muutu siirryttäessä tutkaheijastimesta toiseen. Merkittävimmät geometriaerot löytyvät tutkaheijastimien TH2 ja TH6 (kaarevat sopit) ja TH9 (epäsymmetriset sopit) väliltä. Diffraktiovaikutuksen selvittämiseksi suoritettiin laskennat perustapaukselle (kuvattu kappaleessa 3.2.1) ottamalla huomioon diffraktiovaikutus PTD-menetelmällä ja vertaamalla saatuja tuloksia ilman diffraktiota laskettuihin tuloksiin. Kuvasta 2 nähdään, että taajuudella 3 GHz diffraktiovaikutus on suurin TH2:ssa ja TH6:ssa. Ilmiö johtuu soppien kaarevasta reunasta. Reunan kaarevuuden aiheuttama vaikutus häviää 9 GHz taajuudella.



Kuva 2. Diffraaktion vaikutus laskentatuloksiin.

Tutkapoikkipinta riippuu valaistavan kohteen koosta. Koon vaikutus voidaan poistaa normalisoimalla tutkaheijastimen tulokset poikkipinnaltaan yhtä suuren levyn antamalla tutkapoikkipinnalla. Normalisoiduissa tuloksissa soppiryhmillä TH2, TH6 ja TH8 diffraktion aiheuttama muutos on muita suurempi molemmilla taajuuksalueilla.



Kuva 3. Diffraaktion vaikutus normalisoituihin laskentatuloksiin.

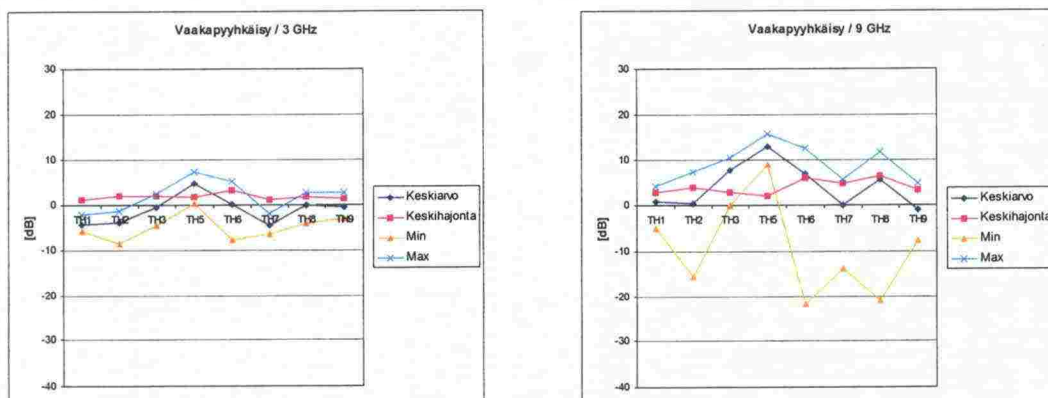
Tuloksista nähdään, että soppien reunamuoto vaikuttaa hiukan soppiryhmän sirontaominaisuuksiin, mutta sen kokonaisvaikutus on merkityksetön suhteessa sopen kokonaissirontaan. Tästä syystä sekä laskenta-ajan lyhentämiseksi diffraktion huomiointi poistettiin vertailulaskennoista.

## 3.2 Soppiryhmien vertailua

Tässä kappaleessa esitetään yhteenveto tutkaheijastimien välisestä vertailusta. Ensiksi laskettiin eri soppiryhmille referenssitulokset pystyasennossa. Sen jälkeen tutkittiin asennuskorkeuden ja kallistuskulman vaikutusta. Vertailussa käytettiin yksinkertaisia tilastollisia mittareita, kuten keskihajontaa, minimi-, maksimi- ja keskiarvoa. Tutkaheijastimien vertailu tehtiin vertailemalla sekä absoluuttisia että normalisoituja tuloksia. Tutkaheijastimen koko vaikuttaa absoluuttisiin tuloksiin. Normalisoiduista tuloksista koon vaikutus on poistettu ja tuloksissa näkyvät tutkaheijastimien geometriaan liittyvät eroavuudet.

### 3.2.1 Tutkaheijastin pystyasennossa

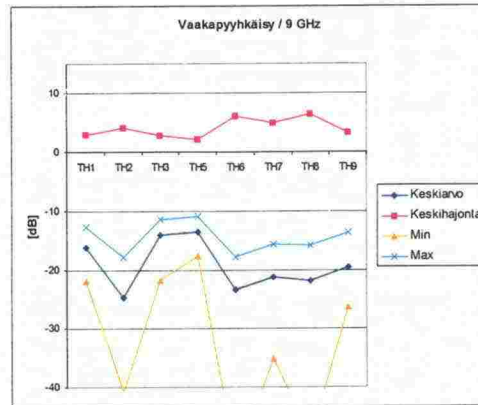
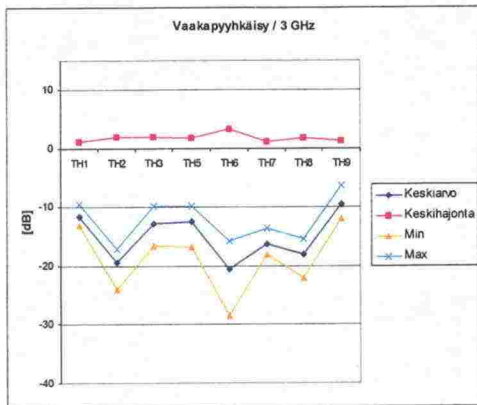
Perustapauksessa tutkaheijastin asetettiin pystyasentoon ja laskennassa ei huomioitu vedenpintaa. Kulmapyyhkäisy tehtiin sekä vaaka- että pystytasossa S (3 GHz) ja X (9 GHz) taajuusalueilla.



Kuva 4. Vaakapyyhkäisy tulokset soppiryhmien ollessa pystyasennossa.

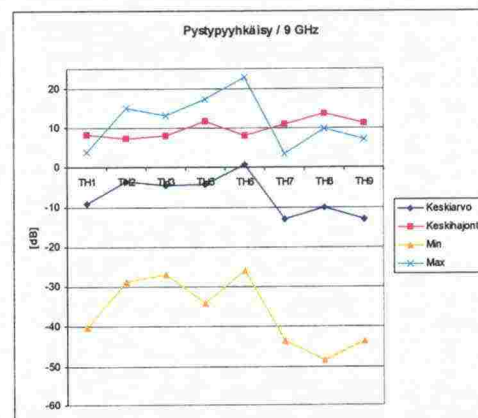
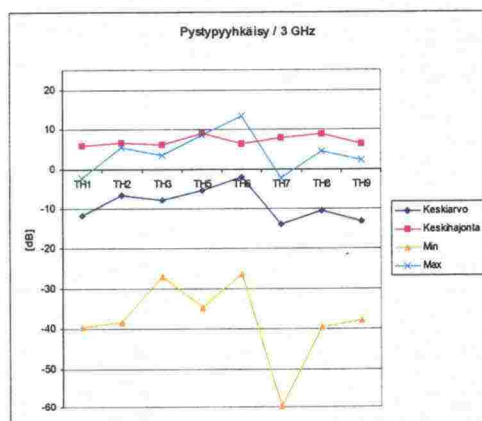
Tuloksista nähdään, että erot eri soppimallien välillä ovat pienet 3 GHz:llä. Kuvasta 4 nähdään, että TH5 on muita parempi, mutta tämä johtuu siitä, että se on myös muita kookkaampi. 9 GHz taajuudella TH3, TH5, TH6 ja TH8 ovat muita hiukan parempia. Tarkastelemalla normalisoituja tuloksia tilanne tasoittuu. 3 GHz taajuudella tutkaheijastimien TH1, TH3, TH5 ja TH9 keskimääräinen sirontataso on muita hiukan parempi. 9 GHz taajuudella tilanne muuttuu siten, että TH1, TH3 ja TH5 toimivat muita paremmin.





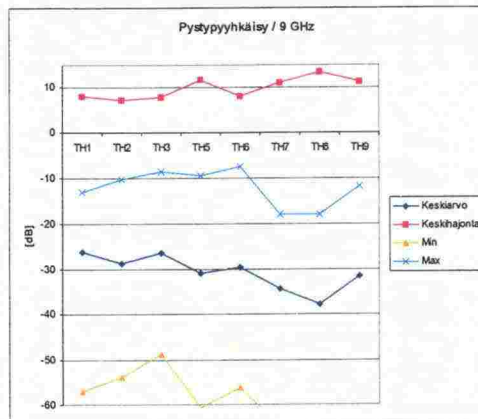
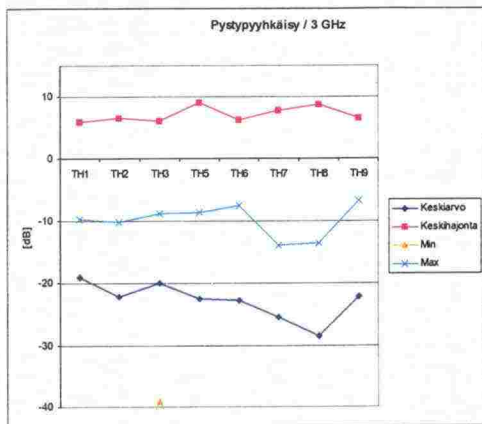
Kuva 5. Normalisoidut vaakapyyhkäisy tulokset soppiyhmien ollessa pystyasennossa.

Seuraavaksi suoritettiin pystypyyhkäisy kuvan 1 mukaisessa koordinaatistossa pystykulmilla  $0^{\circ} - 360^{\circ}$ . Tuloksissa nähdään että tutkaheijastimien TH2, TH3, TH5 ja TH6 keskimääräinen sirontataso on keskimääräistä korkeampi. TH6 on paras molemmilla taajuuksilla.



Kuva 6. Pystypyyhkäisy tulokset soppiyhmien ollessa pystyasennossa.

Normalisoimalla tulokset järjestys muuttuu. Kooltaan pienet TH1 ja TH3 toimivat keskimäärin muita paremmin molemmilla taajuuksilla.



Kuva 7. Normalisoidut pystypyyhkäisy tulokset soppiyhmien ollessa pystyasennossa.

Vertailua ei voida tehdä näin yksinkertaisesti, koska laskennassa on huomioitu koko kulma-alue  $0^{\circ} - 360^{\circ}$ . Todellisuudessa vain arvot lähellä vaakatasoa ovat merkityksellisiä. Rajoittamalla vertailu efektiiviselle käyttöalueelle (määriteltä  $\pm 15^{\circ}$  vaakatasosta) saadaan käyttökelpoisempaa vertailuaineistoa. Efektiivisen käyttöalueen vertailutulokset on esitetty taulukoissa 2 ja 3. Keskiarvosarakkeesta nähdään tutkaheijastimen keskimääräinen sirontataso, normalisoidusta keskiarvosta sirontataso kokoon suhteutettuna ja keskihajonnasta tutkaheijastimen kallistusherkkyys.

Taulukko 2. Efektiivisen käyttöalueen tulokset taajuudella 3 GHz.

	Keskiarvo	Normalisoitu keskiarvo	Keskihajonta
TH1	-11.1	-18.5	6.7
TH2	-6.1	-21.7	5.1
TH3	-0.8	<b>-13.0</b>	2.6
TH5	<b>0.7</b>	-16.4	<b>1.5</b>
TH6	-0.1	-20.9	5.2
TH7	-8.9	-20.5	4.5
TH8	-3.6	-21.7	3.3
TH9	-8.3	-17.3	5.8

Taajuudella 3 GHz TH5 toimii parhaiten. Sen keskimääräinen sirontataso on suurin ja keskihajonta pienin. Eliminoimalla koon vaikutus TH3 on paras.

Korkeammalla taajuudella soppiyhmien järjestys muuttuu. TH6 ja TH8 toimivat muita paremmin, joskin kallistusherkkyys on pienin TH7:llä. Eliminoimalla tuloksista koon vaikutus TH3 toimii edelleen muita paremmin.

Taulukko 3. Efektiivisen käyttöalueen tulokset taajuudella 9 GHz.

	Keskiarvo	Norm. keskiarvo	Keskihajonta
TH1	-7.0	-23.9	7.6
TH2	-1.4	-26.5	5.8
TH3	3.6	-18.2	2.7
TH5	3.7	-23.0	7.8
TH6	7.7	-22.7	3.8
TH7	-1.0	-22.1	1.6
TH8	5.6	-22.0	1.8
TH9	-1.3	-19.9	5.6

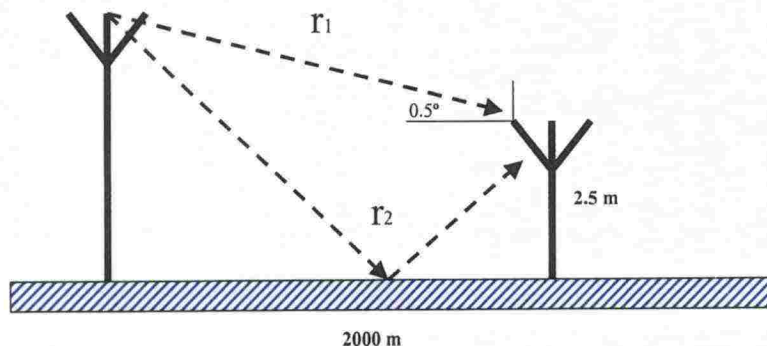
Vaaka- ja pystypyyhkäisyn tulokset viittaavat siihen, että pystyasennossa kaikki tutkaheijastinratkaisut toimivat hyvin molemmilla taajuusalueilla. Tässä on kuitenkin syytä huomauttaa, että efektiivisen pystypyyhkäisyn laskennassa käytettiin vain kahta vaakatason referenssipistettä, joten toisissa pisteissä tulos voi olla erilainen. Tarkempi vertailu vaatii vaaka- ja pystypyyhkäisyn yhdistämisen. Vaadittavien laskentojen suorittaminen tämän projektin puitteissa oli kuitenkin mahdotonta tehdä.

### 3.2.2 Asennuskorkeuden vaikutus

Asennuskorkeuden vaikutusta tutkittiin laskemalla vaakapyyhkäisytulokset kahdella eri korkeudella vedenpinnasta. Tasoaallon tulokulmaa kallistettiin  $0.5^\circ$  pystytasossa, jotta tasoaallon heijastus vedenpinnasta tuli huomioiduksi. Soppiryhmien laskentakorkeudet on esitetty taulukossa 1. Soppiryhmien välillä ei syntynyt oleellisia eroja. Tyypillisesti asennuskorkeuden nostaminen pienensi tehotasoa 3 GHz:llä ja vastaavasti kasvatti sitä 9 GHz:llä. Ilmiö selittyy monitie-etenemisen (suora ja heijastunut reitti) aiheuttamasta vaihe-erosta, joka joko vahvistaa tai heikentää soppiryhmän sirontatasoa. TH5 poikkesi muista tapauksista. Sen kohdalla tehotaso kasvoi sekä 3 GHz:n että 9 GHz:n tapauksessa. Tämä johtuu siitä, että TH5:ssa yksittäisten soppien normaalit poikkeavat eniten keskitasosta, jolloin vaihe-erosta johtuva tehotason muutos toimii eri tavalla.

Asennuskorkeuden vaikutukset eri soppiryhmiin on esitetty liitteessä. Tuloksia ei esitetä tässä graafeina, koska eri soppiryhmien vertailu ei ole yksiselitteinen. Laskennoissa on tutkittu vedenpinnan vaikutusta vain yhden heijastusgeometrian kannalta, joka on esitetty kuvassa 8.





Kuva 8. Vedenpintavaikutuksen laskennassa käytetty heijastusgeometria.

Tutkalähteen ja tutkaheijastimen välinen etäisyys on 2000 m, heijastimen korkeus pienien tutkaheijastimien tapauksissa 2.5 m ja tasoaallon kallistuskulma  $0.5^\circ$ .

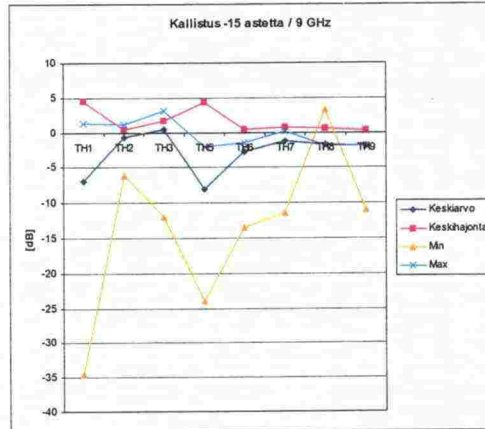
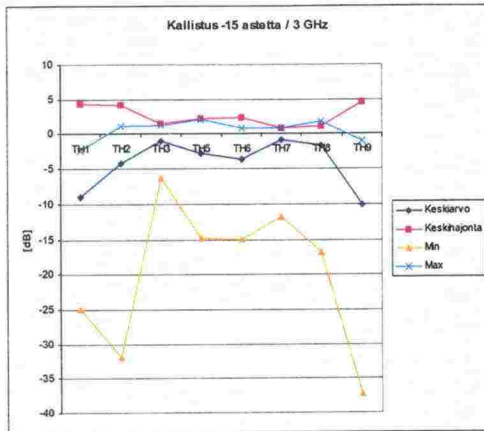
Todellisuudessa tutkalähteen (laiva) etäisyys ja tasoaallon tulokulma suhteessa tutkaheijastimeen muuttuu laivan liikkuessa. Tällöin suoran tasoaallon  $r_1$  ja heijastuneen tasoaallon  $r_2$  vaihe-ero vaihtelee etäisyyden funktiona. Laskemalla tulokset jollakin toisella etäisyys ja tulokulma -parilla voidaan saada hyvinkin erilaiset tulokset. Tuloksiin vaikuttavat käytännössä myös aallokon korkeus ja poijun asento. Nämä tekijät on rajattu analyysin ulkopuolelle.

### 3.2.3 Kallistuserkkyys

Kallistuserkkyuden tutkimiseen pätee sama tosiasia kuin asennuskorkeuteen: vedenpinnan vaikutusta ei voida luotettavasti huomioida. Vedenpinnalla on selvä vaikutus soppiryhmän tehotasoon, mutta todennäköisesti se ei oleellisesti muuta soppiryhmän käyttäytymistä. Kallistuserkkyuden selvittämiseksi tehtiin vertailulaskennat vaakapyyhkäisyllä ja kallistamalla tutkaheijastimia eteenpäin ( $-15^\circ$ ). Koska tutkaheijastimet eivät ole pyörähdyssymmetrisiä, suoritettiin vastaavat laskennat myös kallistamalla tutkaheijastimia taaksepäin ( $15^\circ$ ). Analyysissä vedenpinta huomioitiin heijastavana peilipintana. Saatuja tuloksia verrattiin pystyasennossa saatuihin tuloksiin. Vertailutulokset on esitetty kuvissa 9-12.

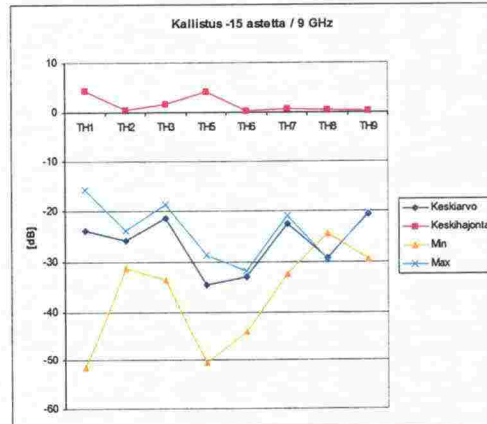
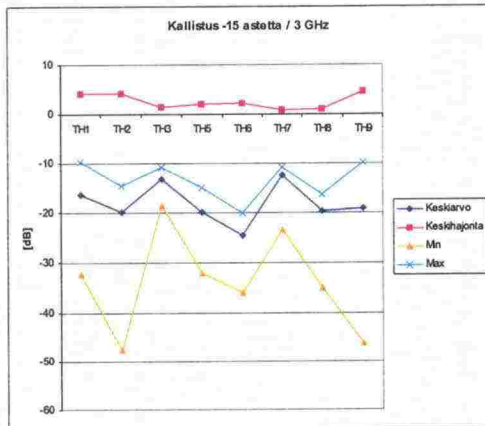
#### Kallistus eteenpäin

Kuvassa 9 esitetään kallistuksen aiheuttama muutos vertailuparametreihin (keskiarvo, keskihajonta, minimi ja maksimi) suhteessa pystyasennossa saatuihin arvoihin. 3 GHz taajuudella tutkaheijastimien TH3, TH7 ja TH8 keskihajonta ja keskimääräisen sirontatason suhde kallistamattomaan ovat muita pienempiä, mikä viittaa pienempään kallistuserkkyuteen. 9 GHz taajuudella TH1 ja TH5 ovat muita herkempiä kallistuksille. Niiden keskihajonta on muita tutkaheijastimia suurempi ja keskimääräisen tehotason suhde kallistamattomaan tapaukseen nähden pienempi.



Kuva 9. Heijastimien kallistusherkkyyden tutkaheijastimien ollessa kallistettuna  $15^\circ$  eteenpäin.

Kuvassa 10 esitetään tulokset normalisoituina. Keskihajontaa ei ole normalisoitu. Pinta-alan suhteutetun keskimääräisen sirontatason muutoksen perusteella 3 GHz taajuudella TH3 ja TH7 ovat vähiten kallistusherkkiä ja 9 GHz taajuudella joukkoon liittyy myös TH9.

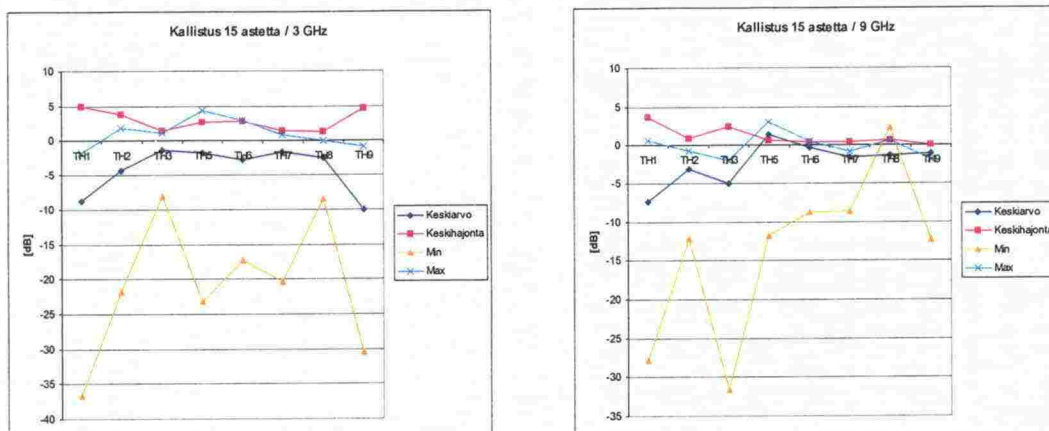


Kuva 10. Heijastimien normalisoitu kallistusherkkyyden tutkaheijastimien ollessa kallistettuna  $15^\circ$  eteenpäin.

Tuloksista päätellen kallistuksen vaikutus on pienin soppiiryhmiin TH3 ja TH7.

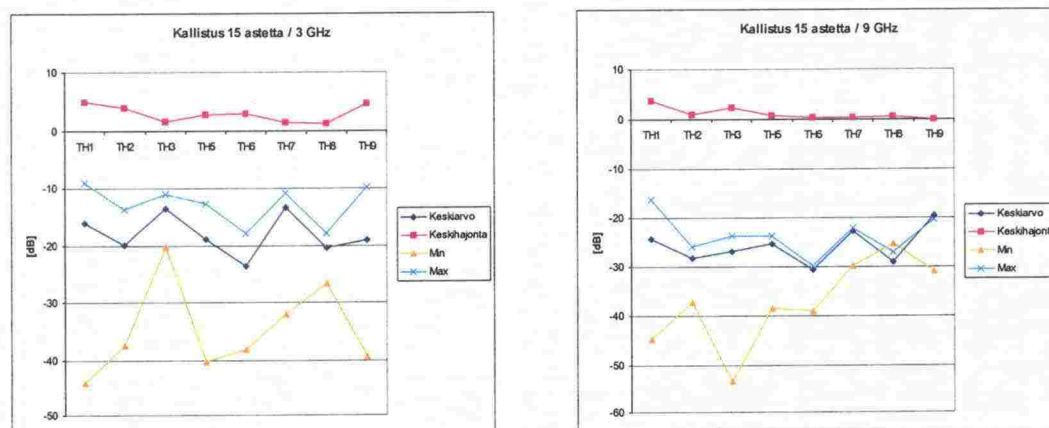
### Kallistus taaksepäin

Tuloksissa eri kallistuskulmilla esiintyy selviä eroja. Keskiarvon perusteella taajuudella 3 GHz TH1 ja TH9 toimivat edelleen heikosti ja TH3 ja TH7 toimivat hyvin. Taajuudella 9 GHz TH9 toimii jo merkittävästi paremmin ja ainoastaan TH1:n kallistusherkkyyden on korkea. Tuloksista näkyy myös, että taajuuden kasvaessa TH3:n kallistusherkkyyden selvästi kasvaa ja vastaavasti TH5:n pienenee. TH5:n keskimääräinen tehotaso on jopa korkeampi kallistettuna kuin pystyasennossa. Tämä johtunee siitä, että TH5:n yksittäisten soppien normaalit poikkeavat eniten keskitasosta.



Kuva 11. Heijastimien kallistusherkkyys tutkaheijastimien ollessa kallistettuna 15° taaksepäin.

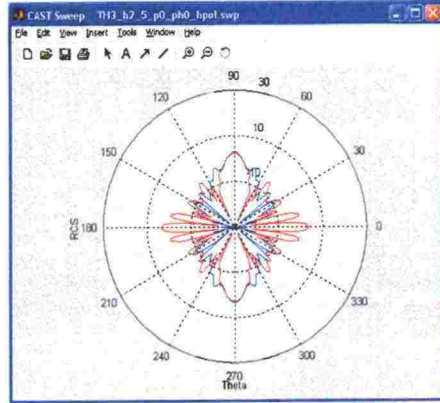
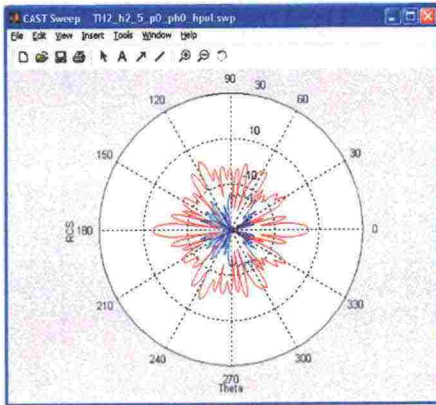
Normalisoiduilla arvoilla 3 GHz:n tapauksessa TH3 ja TH7 kestävät kallistusta parhaiten. 9 GHz taajuudella erot selvästi tasoittuvat. TH1, TH5, TH7 ja TH9 toimivat muita paremmin, joskaan eroilla ei ole kovin suurta käytännön merkitystä.



Kuva 12. Heijastimien normalisoitu kallistusherkkyys tutkaheijastimien ollessa kallistettuna 15° taaksepäin.

Tutkaheijastimien kallistusherkkyyttä ei voida määrittää pelkästään kahden kallistuskulman perusteella, vaan vertailussa olisi otettava huomioon laajempi avaruusalue. Tämän projektin puitteissa se ei ollut mahdollista. Tutkaheijastimien vertailua jatkettiin vertaamalla yksittäisten tutkaheijastimien pystypyyhkäisyssä saatuja sirontakuvioita keskenään. Esimerkiksi tarkempi tarkastelu soppiryhmien TH2 ja TH3 välillä paljastaa merkittäviä eroja. Kuvassa 13 TH2:n sirontakuviokuva vaakatasaossa (suunnat 90° ja 270°) on selvästi liuskoittuneempi kuin TH3:n. TH3:n sirontakuviossa pääkeila on hyvin leveä, osoittaa kohti vaakatasa ja kattaa käytännössä koko efektiivisen käyttöalueen. Vastaavasti TH2:n sirontakuviossa näkyy kaksi hiukan vahvempaa pääkeilaa (kuvassa 13 suunnat 120° ja 60°), mutta ne ovat hyvin kapeita verrattuna TH3:n pääkeilaan.





Kuva 13. Pystypyyhkäisyjen sirontakuvio TH2 ja TH3 tapauksissa.

Kuvan 13 perusteella voidaan olettaa, että TH3 toimii efektiivisellä alueella ( $75^{\circ}$  -  $105^{\circ}$  ja  $255^{\circ}$  -  $285^{\circ}$ ) selvästi paremmin kuin TH2.

### 3.3 Yksittäisten tutkaheijastimien tulokset

Johtopäätösten teko eri tutkaheijastimien välillä pelkästään vertailemalla edellä esitettyjä tilastomuuttujiin perustuvia tuloksia ei ole riittävää. Tarkempi analyysi vaatii heijastin-kohtaisten tulosten tutkimista.

Laskentamallin ja todellisen mallin vastaavuuden toteamiseksi tulosten yhteyteen on liitetty kuva tutkaheijastimesta, sen CAD-mallista ja laskennassa käytetystä mallista. Kuvan alla on esitetty molemmilla taajuuksilla vaakapyyhkäisyyn tulokset tutkaheijastimen ollessa pystyasennossa ja kallistettuna  $15^\circ$  eteenpäin. Laskennassa on huomioitu vedenpinta ja pystyasennon tapauksessa myös diffraktio. Sirontakuviassa punaisella värillä esitetään vaaka- ja sinisellä pystypolarisaatio. Vaakapolarisaatio-komponentti on analyysin kannalta oleellisempi.

#### 3.3.1 CAD-mallinnuksen aikana tehtyjä havaintoja

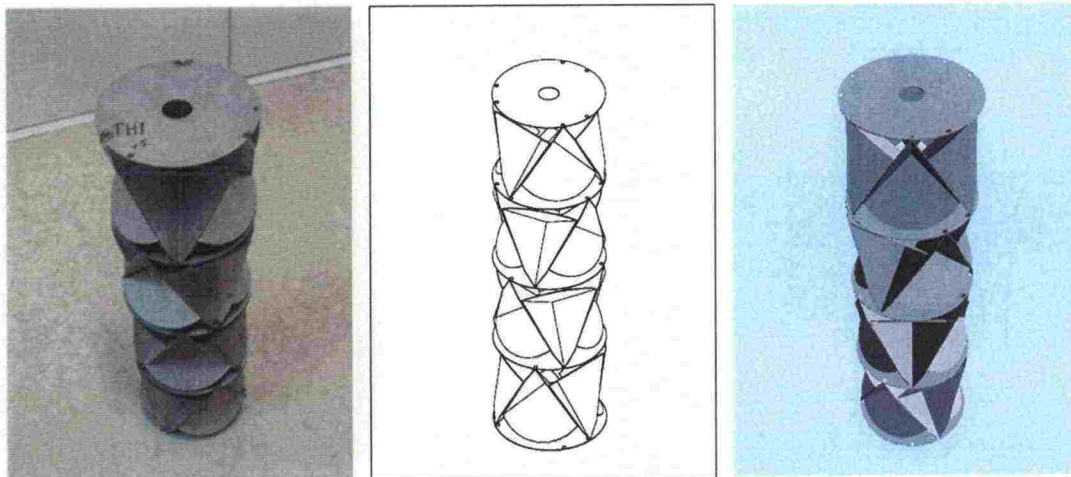
##### 1. Tutkaheijastin TH1:

- Välilevyjen, joiden välissä soppielementit sijaitsevat, etäisyys vaihtelee välillä 112-116 mm. CAD-mallissa väli on aina 117 mm.
- Soppien mitoissa ja muodossa on selviä vaihteluita.
- Soppien kulma vaakatason suhteen eri soppien välillä vaihtelee noin  $\pm 3^\circ$ .

##### 2. Tutkaheijastin TH2 - TH9:

- Kaikissa heijastimissa soppien mitoissa ja muodoissa on suunnilleen samansuuruisia vaihteluita kuin TH1:ssä.
- Soppien kulmavaihtelu vaakatason suhteen, yksittäisessä heijastimessa olevien soppien välillä, on suunnilleen samaa luokkaa kuin TH1:n tapauksessa.

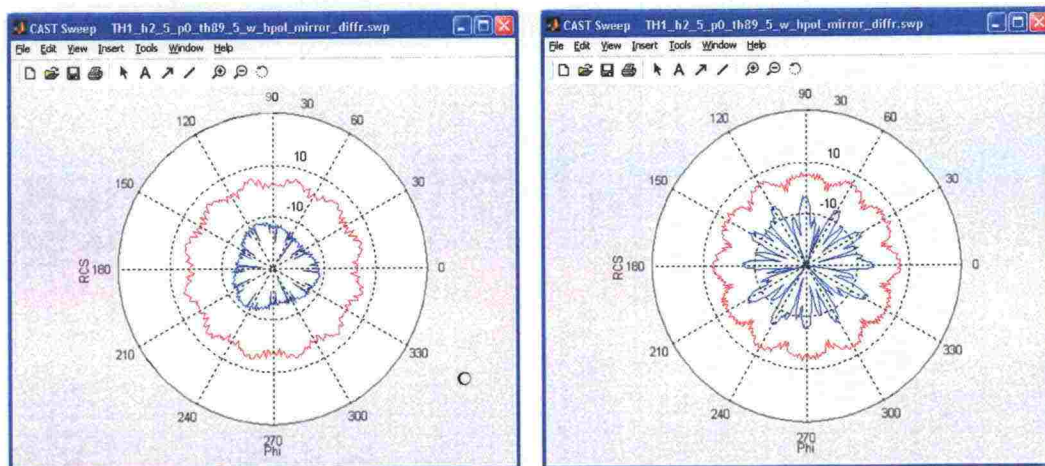
### 3.3.2 Tutkaheijastin 1



Kuva 14. Tutkaheijastin TH1 (halkaisija 14 cm, korkeus 47cm, poikkipinta-ala 658 cm<sup>2</sup>).

Mallissa soppielementit on asemoitu siten, että soppien normaalit osoittavat vaakasuoraan. Soppielementtien reunat ovat terävät. Heijastimen mekaanista poikkipintaa vastaavan suoran metallilevyn tutkapoikkipinnat ovat 7.4 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 16.9 dBm<sup>2</sup> (9 GHz).

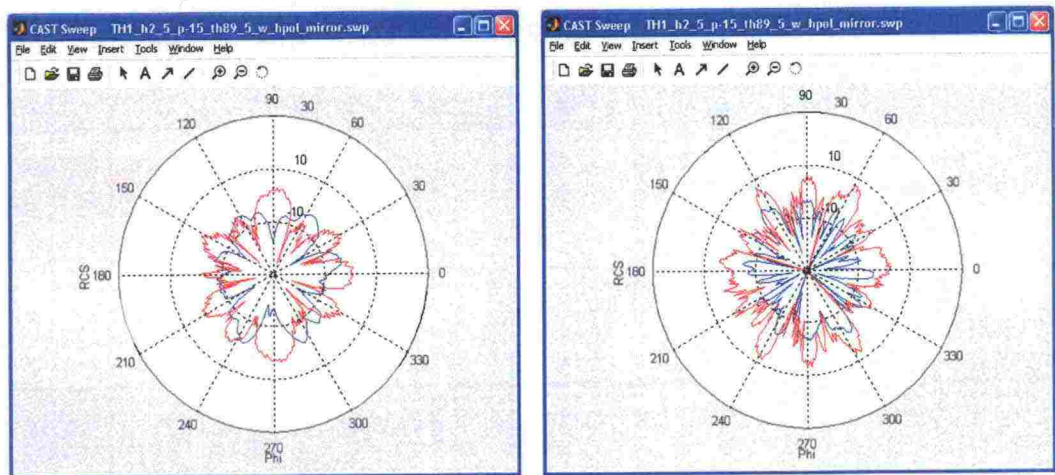
#### Sirontakuviot



Kuva 15. Vaakapyyhkäisyn tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa pystyasennossa.

TH1:n sirontakuviot on symmetriset molemmilla taajuuksilla. Kuviossa ei esiinny voimakkaita minimikohtia. Mielenkiintoinen piirre on, että sirontakuviossa minimi- ja maksimikohdat vaihtavat paikkaa taajuuden vaihtuessa.





Kuva 16. Vaakapyyhkäisyn tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa kallistettuna 15° eteenpäin.

Kallistuksen seurauksena sirontakuvioon ilmestyy voimakkaita tasovaihteluita. Takaisinsironta on suurin kallistussuuntaan (0°) kun taas takasektorin suuntaan (180°) tehotaso putoaa. Kallistuskulman vaikutus 3 GHz taajuudella on suurempi kuin 9 GHz taajuudella.

#### Yhteenveto keskeisimmistä laskennoista

Keskeisimmät laskentatulokset on koottu taulukkoon 4. Korkeudella 2.5 m vaakatason tutkapoikkipinnan keskimääräinen vaihtelu on n. 1.3 dB (3 GHz) ja 1.7 dB (9 GHz), kun heijastin on pystyssä. Maksimin suuruus on 5.8 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 6.8 dBm<sup>2</sup> (9 GHz). Pystyssä olevan heijastimen nostaminen 2.5 metristä 4 metriin pienentää heijastusta n. 6.2 dB 3 GHz:llä, mutta kasvattaa sitä n. 1.7 dB 9 GHz:llä. Molemmilla taajuuksilla kallistaminen pienentää keskiarvoa ja kasvattaa keskihajontaa.

Taulukko 4. Yhteenveto TH1:n laskentatuloksista.

	3 GHz				9 GHz			
	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max
Korkeus=2.5m, kallistus=0	3.4	1.3	0.1	5.8	4.2	1.7	-0.7	6.8
Korkeus=4m, kallistus=0	-2.8	1.5	-6.9	0.0	5.9	1.5	2.9	8.1
Korkeus=2.5m, kallistus=15	-5.4	6.3	-36.9	4.0	-3.4	5.5	-29.3	7.2
Korkeus=2.5m, kallistus=-15	-5.6	5.7	-25.1	3.4	-3.0	6.3	-36	7.9

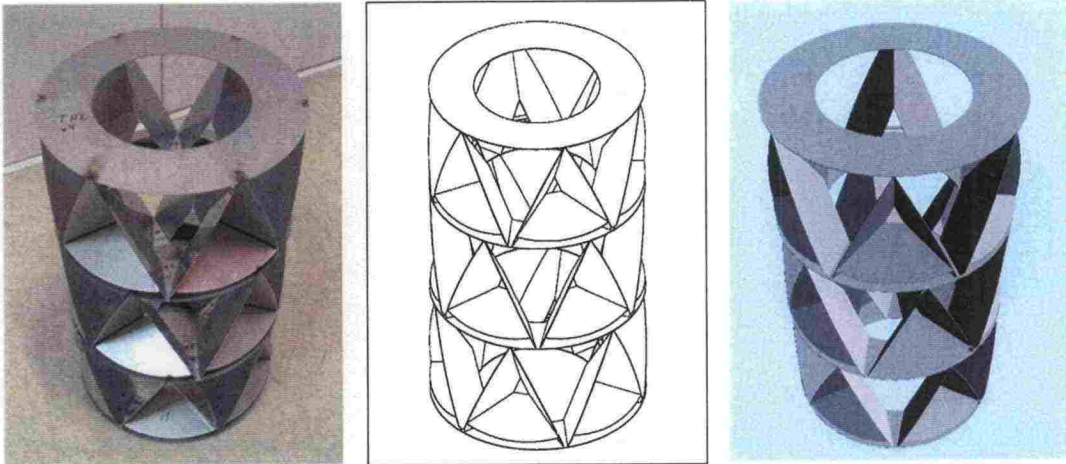
#### Huomioita yksittäisistä laskennoista

Kommentit liittyvät TH1\_kuvat.ppt-tiedostoon ja suluissa on esitetty huomioon liittyvä(t) sivu(t). Huomiot koskevat vaakapolarisaatiokomponenttia.

- (2-3): Sirontakuvio on säännöllinen eikä kuviossa esiinny voimakkaita minimikohtia. Tehotaso on vaatimaton molemmilla taajuuksilla.
- (4-5): Molemmilla taajuuksilla sirontakuvio on erittäin liuskoittunut. Leveät pääkeilat osoittavat suuntiin 0° (ylöspäin) ja 180° (alaspäin), koska tutkaheijastimesta näkyy vain kansi- tai pohjalevy.

- (6-9): Vedenpinta nostaa tehotasoa ja aiheuttaa nopeaa tehotason vaihtelua eli rippeliä. Korkeuden muuttamisella ei ole merkittävää vaikutusta heijastimen sirontakuvion muotoon. Asennuskorkeuden nostaminen pienentää tehotasoa 3 GHz ja kasvattaa 9 GHz taajuudella.
- (10-13): Kallistukset aiheuttavat laajojen matalatehoisten alueiden syntymisen.
- (14-15): Diffraktion huomiointi ei vaikuta merkittävästi sirontakuviin.

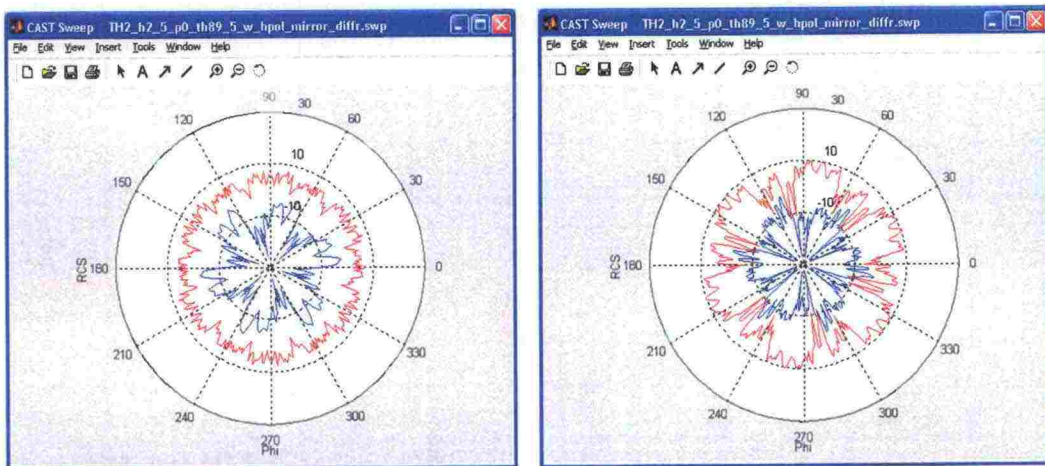
### 3.3.3 Tutkaheijastin 2



Kuva 17. Tutkaheijastin TH2 (halkaisija 32 cm, korkeus 53 cm, poikkipinta-ala 1696 cm<sup>2</sup>).

Soppielementtien pohjissa on reiät, soppien reunat ovat kaarevia ja soppielementit on suunnattu hiukan alaspäin. Heijastimen mekaanista poikkipintaa vastaavan suoran metallilevyn tutkapoikkipinnat ovat 15.6 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 25.1 dBm<sup>2</sup> (9 GHz).

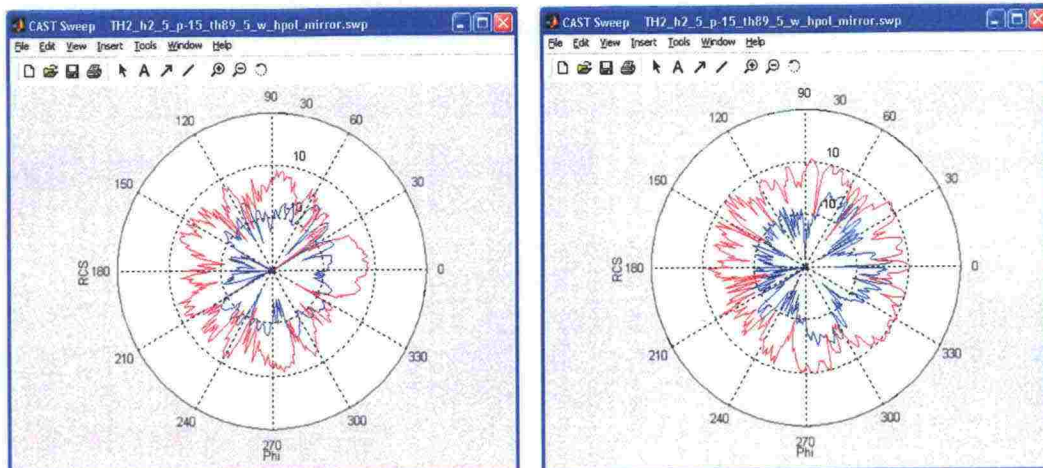
#### Sirontakuviot



Kuva 18. Vaakapyyhkäisyyn tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa pystyasennossa.

Tutkaheijastimen sirontakuviot on symmetriset ja soppien asemointi näkyy selvästi. Soppielementtien välissä olevien reikien aiheuttamat tehotason putoamiset näkyvät molemmissa sirontakuvioissa. Etenkin 9 GHz taajuudella reikien vaikutus korostuu.





Kuva 19. Vaakapyyhkäisy tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa kallistettuna 15° eteenpäin.

3 GHz taajuudella sirontakuvio on liuskoittunut etenkin takasektorin (90° - 270°) suuntaan. Kallistuksen suuntaan tehotaso kasvaa ja takasektoriin pienenee etenkin 3 GHz taajuudella. Molemmilla taajuuksilla esiintyy voimakkaita yksittäisiä minimikohtia.

### Yhteenveto keskeisimmistä laskennoista

Keskeisimmät laskentatulokset on koottu taulukkoon 5. Korkeudella 2.5 m vaakatason tutkapoikkipinnan keskimääräinen vaihtelu on n. 2.1 dB (3 GHz) ja 5.2 dB (9 GHz), kun heijastin on pystyssä. Maksimin suuruus on 7.7 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 10.3 dBm<sup>2</sup> (9 GHz). Pystyssä olevan heijastimen nostaminen 2.5 metristä 4 metriin pienentää heijastusta n. 5.8 dB 3 GHz:llä, mutta kasvattaa n. 0.5 dB 9 GHz:llä.

Taulukko 5. Yhteenveto TH2:n laskentatuloksista.

	3 GHz				9 GHz			
	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max
Korkeus=2.5m, kallistus=0	3.9	2.1	-2.0	7.7	3.6	5.2	-12.3	10.3
Korkeus=4m, kallistus=0	-1.9	2.7	-8.3	3.9	4.1	6.3	-17.0	12.4
Korkeus=2.5m, kallistus=15	-0.1	5.9	-23.1	9.5	1.3	5.6	-23.9	9.7
Korkeus=2.5m, kallistus=-15	0.0	6.3	-33.2	8.8	3.7	5.2	-17.8	11.7

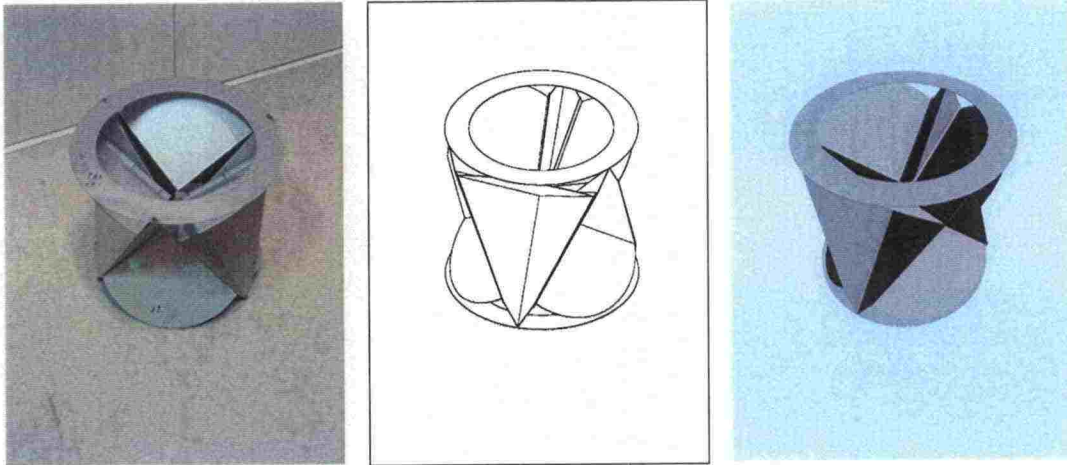
### Huomioita yksittäisistä laskennoista

Kommentit liittyvät TH2\_kuvat.ppt-tiedostoon ja suluissa on esitetty huomioon liittyvä(t) sivu(t). Huomiot koskevat vaakapolarisaatiokomponenttia.

- (2-3): Sirontakuvio on säännöllinen. Reiät soppien välissä ja soppien pohjissa aiheuttavat sirontakuvioon rippeliä. Tehotaso on vaatimaton molemmilla taajuuksilla.
- (4-5): Molemmilla taajuuksilla sirontakuvio on erittäin liuskoittunut. Soppielementtien normaaleiden suuntien poikkeaminen vaakatasosta aiheuttaa epäsymmetrisyyttä sirontakuvioon.

- (6-9): Vedenpinta nostaa tehotasoa ja aiheuttaa rippeliä. Korkeuden muuttamisella ei ole merkittävää vaikutusta heijastimen sirontakuvion muotoon. Asennuskorkeuden nostaminen pienentää tehotasoa molemmilla taajuuksilla.
- (10-13): Kallistukset aiheuttavat pääkeilan sivulle voimakkaita minimikohtia. Tehotaso pysyy tasaisena 3 GHz:llä, mutta 9 GHz:llä tehotaso takasektorissa putoaa hieman.
- (14-15): Diffraaktion huomiointi ei vaikuta merkittävästi sirontakuviioon.

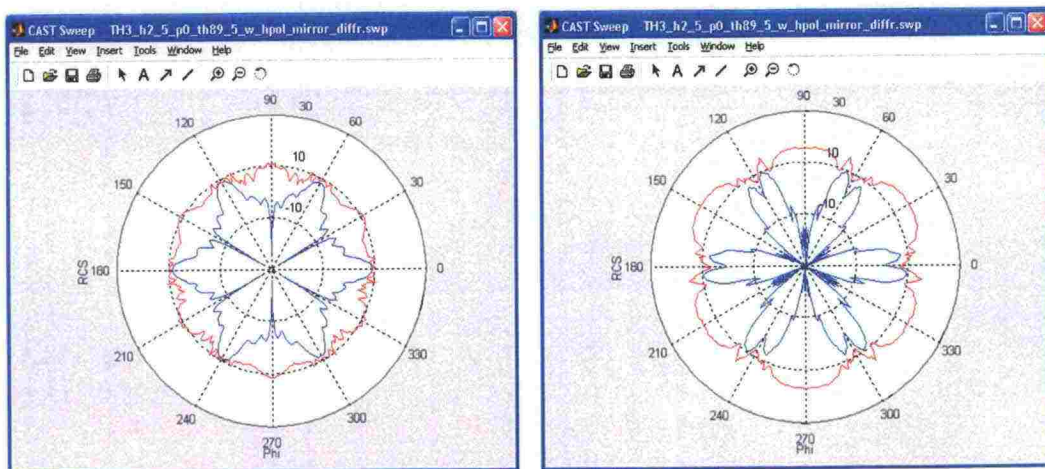
### 3.3.4 Tutkaheijastin 3



Kuva 20. Tutkaheijastin TH3 (halkaisija 36 cm, korkeus 32 cm, poikkipinta-ala 1152 cm<sup>2</sup>).

Tutkaheijastin koostuu kuudesta isosta soppielementistä, joiden reunat ovat terävät. Heijastimen mekaanista poikkipintaa vastaavan suoran metallilevyn tutkapoikkipinnat ovat 12.3 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 21.8 dBm<sup>2</sup> (9 GHz).

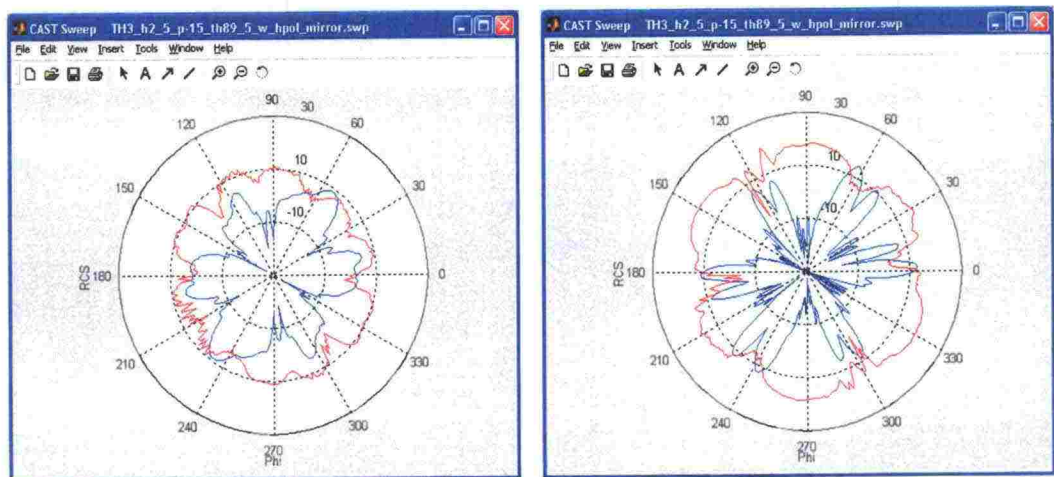
#### Sirontakuviot



Kuva 21. Vaakapyyhkäisyyn tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa pystyasennossa.

Pystyasennossa sirontakuviot ovat hyvin symmetrisiä ja tehotaso pysyy korkeana molemmilla taajuuksilla. Alaspäin osoittavien soppielementtien vaikutus näkyy kuvissa paikallisina piikkeinä etenkin 9 GHz taajuudella.





Kuva 22. Vaakapyyhkäisyn tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa kallistettuna 15° eteenpäin..

Kallistuksen seurauksena sirontakuvioon syntyy tasokuoppia, mutta molemmilla taajuuksilla heijastin säilyttää yllättävän hyvin tehotasonsa kaikkiin suuntiin. Mielenkiintoista on, että minimikohdat näyttävät syntyvän sekä kallistussuuntaan että vastakkaiseen suuntaan.

### Yhteenveto keskeisimmistä laskennoista

Keskeisimmät laskentatulokset on koottu taulukkoon 6. Korkeudella 2.5 m vaakatason tutkapoikkipinnan keskimääräinen vaihtelu on n. 1.5 dB (3 GHz) ja 2.7 dB (9 GHz), kun heijastin on pystyssä. Maksimin suuruus on 11.3 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 16.8 dBm<sup>2</sup> (9 GHz). Pystyssä olevan heijastimen nostaminen 2.5 metristä 4 metriin pienentää heijastusta n. 6.8 dB 3 GHz:llä ja n. 6.1 dB 9 GHz:llä. Kallistaminen kasvattaa keskihajontaa.

Taulukko 6. Yhteenveto TH3:n laskentatuloksista.

	3 GHz				9 GHz			
	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max
Korkeus=2.5m, kallistus=0	8.5	1.5	4.4	11.3	13.5	2.7	6.9	16.8
Korkeus=4m, kallistus=0	1.7	2.1	-3.2	6.4	7.4	3.2	-6.2	14.3
Korkeus=2.5m, kallistus=15	6.9	3.1	-4.3	12.2	8.5	5.1	-24.7	14.8
Korkeus=2.5m, kallistus=-15	7.2	3.3	-2.4	12.5	14.0	4.4	-5.0	20.0

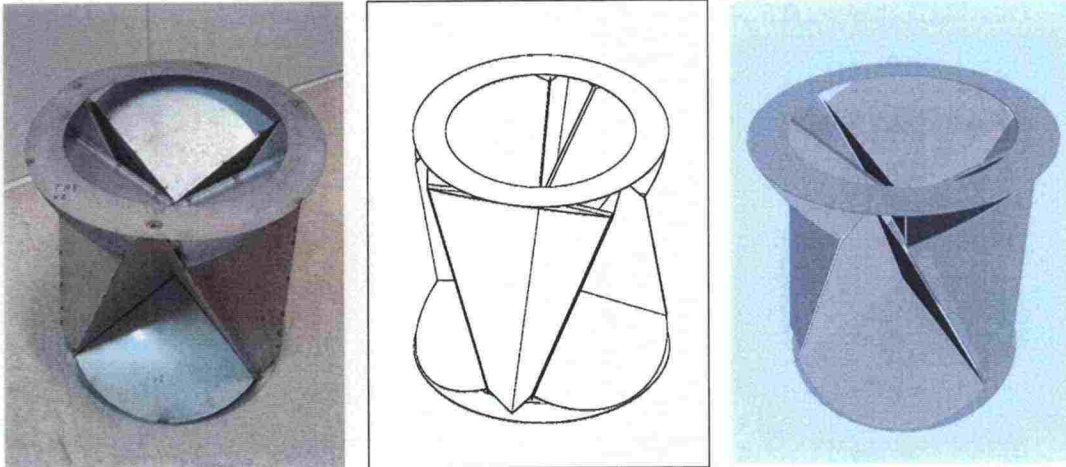
### Huomioita yksittäisistä laskennoista

Kommentit liittyvät TH3\_kuvat.ppt-tiedostoon ja suluissa on esitetty huomioon liittyvä(t) sivu(t). Huomiot koskevat vaakapolarisaatiokomponenttia.

- (2-3): Sirontakuvi on säännöllinen. Tehotaso on kohtalainen. Sekä 3 GHz:llä että 9 GHz:llä sirontakuviossa esiintyy tasokuoppia soppielementtien reunoja kohden siirryttäessä.
- (4-5): Pääkeila on voimakas ja leveä. Tästä tarkastelusuunnasta tutkaheijastin sietää hyvin suurempiakin pystykulmavaihteluita.

- (6-9): Vedenpinta nostaa tehotasoa, vähentää sirontakuvion kuoppien syvyyttä ja aiheuttaa rippeliä. Korkeuden muuttamisella ei ole merkittävää vaikutusta heijastimen sirontakuvion muotoon. Asennuskorkeuden nostaminen pienentää tehotasoa molemmilla taajuuksilla.
- (10-13): Kallistus kasvattaa tehotasovaihtelua, muttei 3 GHz taajuudella synnytä voimakkaita minimikohtia. Muutama yksittäinen minimikohta esiintyy 9 GHz:llä.
- (14-15): Diffraktion huomiointi ei vaikuta merkittävästi sirontakuvioon.

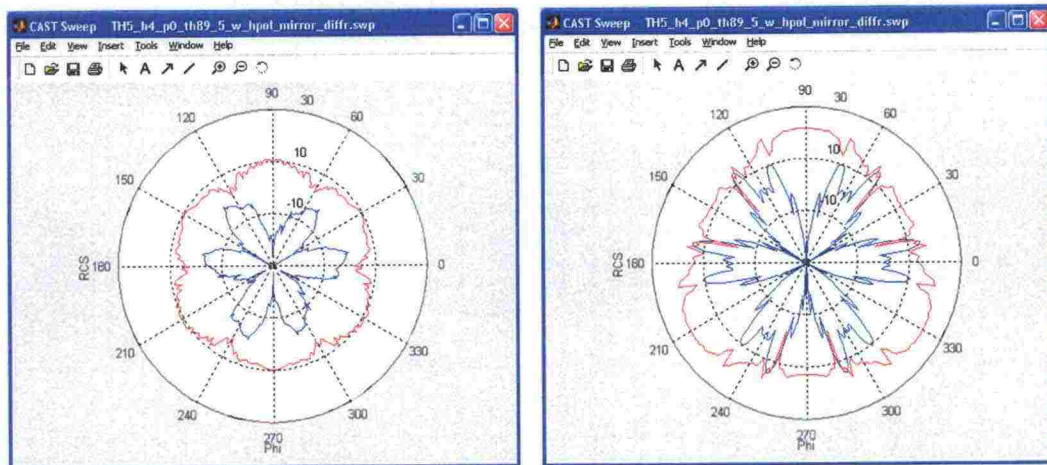
### 3.3.5 Tutkaheijastin 5



Kuva 23. Tutkaheijastin TH5 (halkaisija 45 cm, korkeus 45 cm, poikkipinta-ala 2025 cm<sup>2</sup>).

TH5 on halkaisijaltaan iso tutkaheijastin. Soppielementtien reunat ovat terävät ja joka toinen soppi osoittaa alaviistoon ja joka toinen yläviistoon. Heijastimen mekaanista poikkipintaa vastaavan suoran metallilevyn tutkapoikkipinnat ovat 17.1 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 26.7 dBm<sup>2</sup> (9 GHz).

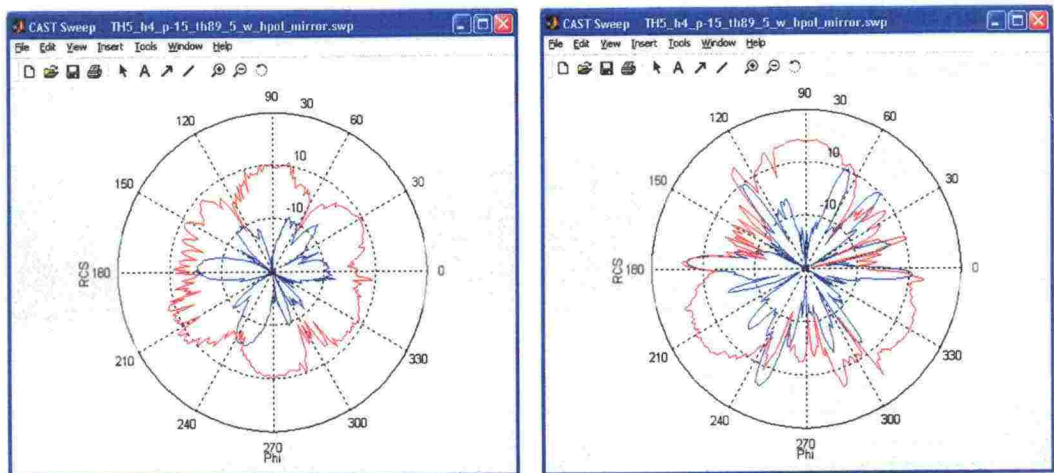
#### Sirontakuviot



Kuva 24. Vaakapyyhkäisyyn tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa pystyasennossa.

Pystyasennossa sirontakuviot 3 GHz:llä on symmetrinen ja kuviosta näkyy selvästi soppielementit. 9 GHz taajuudella soppien asento näkyy yhä selvemmin ja soppi-elementtien reuna-alueelle syntyy voimakkaita minimikohtia.





Kuva 25. Vaakapyyhkäisyn tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa kallistettuna 15° eteenpäin.

Kallistuksen seurauksena sirontakuvio liuskoittuu. 3 GHz taajuudella tutkaheijastin säilyttää varsin hyvin tehotasonsa. 9 GHz taajuudella syntyy matalatehoisia sektoreita, suorastaan pimeitä alueita.

#### Yhteenveto keskeisimmistä laskennoista

Keskeisimmät laskentatulokset on koottu taulukkoon 7. Vaakatason tutkapaokkipinnan keskimääräinen vaihtelu on n. 2.1 dB (3 GHz) ja 4.5 dB (9 GHz), kun heijastin on pystyssä ja korkeus vedenpinnasta on 4 m. Maksimin suuruus on 11.0 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 21.8 dBm<sup>2</sup> (9 GHz). Pystyssä olevan heijastimen nostaminen 4 metristä 6 metriin kasvattaa tehotasoa n. 0.5 dB 3 GHz:llä ja n. 6.4 dB 9 GHz:llä. Kallistaminen kasvattaa keskihajontaa.

Taulukko 7. Yhteenveto TH5:n laskentatuloksista.

	3 GHz				9 GHz			
	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max
Korkeus=4m, kallistus=0	7.7	2.1	1.2	11.0	15.5	4.5	-3.1	21.8
Korkeus=6m, kallistus=0	8.2	1.9	3.2	11.4	21.9	2.1	18.2	24.9
Korkeus=4m, kallistus=15	5.8	4.8	-21.4	15.3	16.9	5.3	-15.7	24.8
Korkeus=4m, kallistus=-15	4.9	4.4	-13.1	13.1	7.5	9.0	-27.9	19.7

#### Huomioita yksittäisistä laskennoista

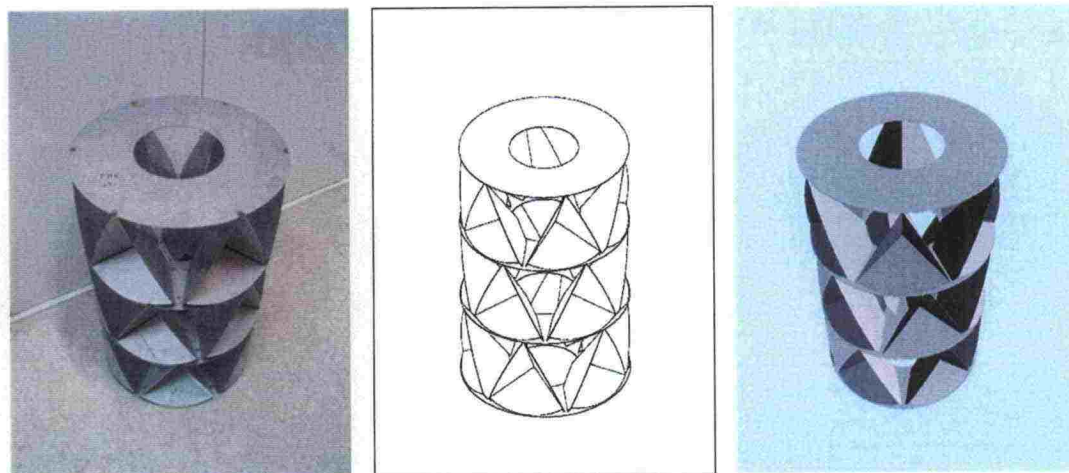
Kommentit liittyvät TH5\_kuvat.ppt-tiedostoon ja suluissa on esitetty huomioon liittyvä(t) sivu(t). Huomiot koskevat vaakapolarisaatiokomponenttia.

- (2-3): Sirontakuvio on säännöllinen ja tehotaso korkea. Yksittäisten soppielementtien asennot näkyvät sirontakuviossa.
- (4-5): Kuvioista näkyy selvästi soppielementtien voimakkaampi suuntaus pois vaakatasosta. Tästä tarkastelusuunnasta tutkaheijastin sietää hyvin suurempiakin

pystykulmavaihteluita. Pääkeila on 3 GHz:llä tasainen, mutta 9 GHz:llä siinä esiintyy liuskoittumista.

- (6-9): Vedenpinta nostaa tehotasoa ja tuo 3 GHz taajudella soppielementit selvemmin esille. 9 GHz taajuudella näkyy soppielementtien asento. Korkeuden kasvattaminen hävittää asentojen vaikutuksen. Asennuskorkeuden nostaminen kasvattaa tehotasoa 3 GHz:llä ja 9 GHz:llä.
- (10-13): Kallistus kasvattaa tasovaihtelua. Muutamia paikallisia minimikohtia esiintyy.
- (14-15): Diffraktion huomiointi ei vaikuta merkittävästi sirontakuviin.

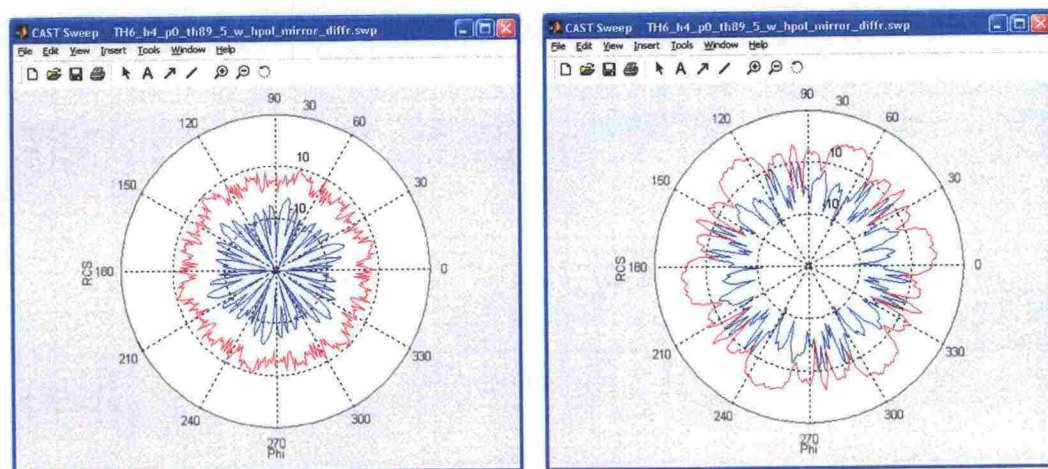
### 3.3.6 Tutkaheijastin 6



Kuva 26. Tutkaheijastin TH6 (halkaisija 45 cm, korkeus 69 cm, poikkipinta-ala 3105 cm<sup>2</sup>).

TH6 on toinen halkaisijaltaan iso tutkaheijastin. Soppielementit on ladottu kolmeen tasoon siten, että kaikki soppielementit on asemoitu samoin päin. Soppien reunat ovat kaarevat ja soppielementtien välissä on reiät. Heijastimen mekaanista poikkipintaa vastaavan suoran metallilevyn tutkapoikkipinnat ovat 20.8 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 30.4 dBm<sup>2</sup> (9 GHz).

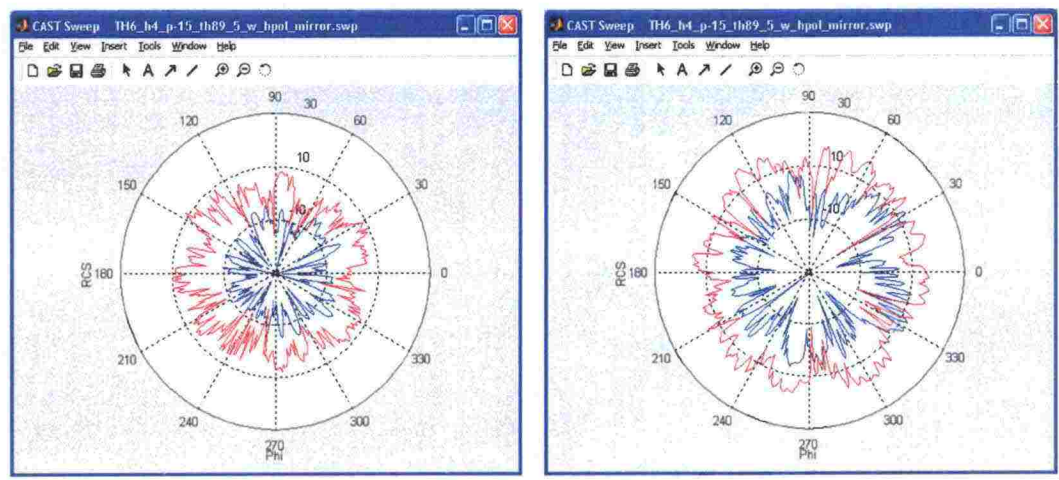
#### Sirontakuviot



Kuva 27. Vaakapyyhkäisyn tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa pystyasennossa.

Soppielementtien sijoittelulla on saavutettu varsin tasainen säteilykuvio 3 GHz taajuudella. 9 GHz taajuudella soppielementit toimivat antenniryhmänä ja säteilykuviioon muodostuu voimakkaita tehotason vaihteluita.





Kuva 28. Vaakapyyhkäisyyn tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa kallistettuna 15° eteenpäin.

Kallistuksen seurauksena sirontakuvio liuskoittuu ja yksittäisiä minimikohtia ilmestyy sirontakuvioon. Mielenkiintoista on, että 3 GHz taajuudella kallistussuuntaan tehotaso putoaa ja takasektoriin taas kasvaa. Yleisesti ottaen molemmilla taajuuksilla tutkaheijastin säilyttää hyvin sirontaominaisuudet kaikkiin suuntiin.

### Yhteenveto keskeisimmistä laskennoista

Keskeisimmät laskentatulokset on koottu taulukkoon 8. Vaakatason tutkapoikkipinnan keskimääräinen vaihtelu on n. 2.4 dB (3 GHz) ja 4.9 dB (9 GHz), kun heijastin on pystyssä 4.0 m korkeudella vedenpinnasta. Maksimin suuruus on 10.3 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 19.7 dBm<sup>2</sup> (9 GHz). Pystyssä olevan heijastimen nostaminen 4 metristä 6 metriin ei vaikuta oleellisesti heijastuksen tasoon, mutta kallistaminen kasvattaa keskihajontaa etenkin 9 GHz:llä.

Taulukko 8. Yhteenveto TH6:n laskentatuloksista.

	3 GHz				9 GHz			
	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max
Korkeus=4m, kallistus=0	5.2	2.4	-0.1	10.3	13.6	4.9	-3.1	19.7
Korkeus=6m, kallistus=0	4.2	3.5	-7.0	8.1	13.6	4.1	0.6	19.3
Korkeus=4m, kallistus=15	2.5	5.5	-18.3	13.6	13.2	5.4	-12.8	20.2
Korkeus=4m, kallistus=-15	1.6	5.0	-16.1	11.5	10.8	5.4	-17.6	18.2

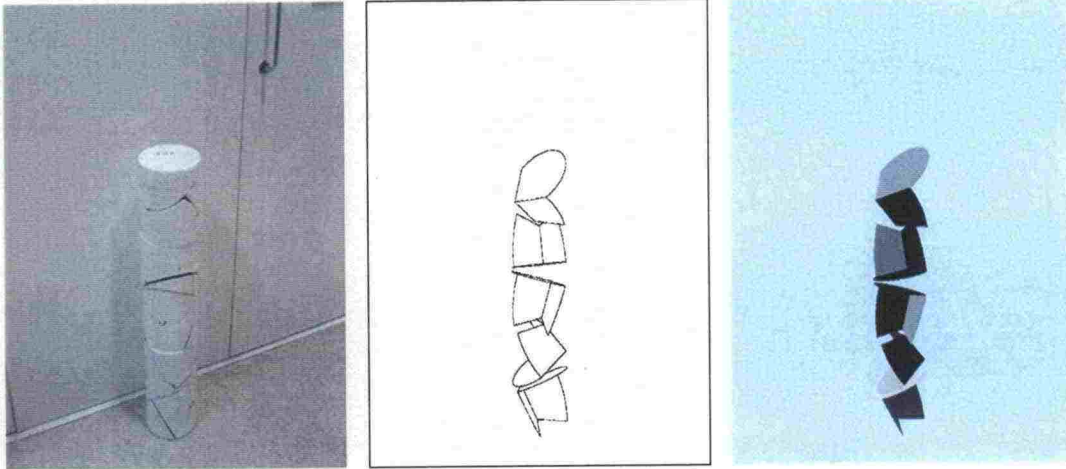
### Huomioita yksittäisistä laskennoista

Kommentit liittyvät TH6\_kuvat.ppt-tiedostoon ja suluissa on esitetty huomioon liittyvä(t) sivu(t). Huomiot koskevat vaakapolarisaatiokomponenttia.

- (2-3): Sirontakuvio on säännöllinen. Tehotaso on kohtalainen, mutta tasovaihtelut suhteellisen suuria. Soppielementtien välissä olevat reiät näkyvät sirontakuviossa. 9 GHz:llä sirontakuviossa esiintyy voimakkaita minimikohtia.

- (4-5): 3 GHz keila on pahasti liuskoittunut. 9 GHz taajuudella sirontakuvio on paljon parempi. Vierekkäiset keilat ovat yhdistyneet eikä pahoja minimikohtia esiinny.
- (6-9): Vedenpinta nostaa tehotasoa, aiheuttaa rippeliä ja tasoittaa minimikohtia etenkin 3 GHz taajuudella. Korkeuden muuttaminen siirtää pääkeilojen suuntaa hiukan (noin 5 astetta). Asennuskorkeuden nostaminen pienentää tehotasoa 3 GHz:llä. 9 GHz taajuudella vastaavaa tehomuutosta ei tapahdu.
- (10-13): Kallistus ei muuta suuresti sirontakuvion muotoa.
- (14-15): Diffraktion huomiointi ei vaikuta merkittävästi sirontakuviioon.

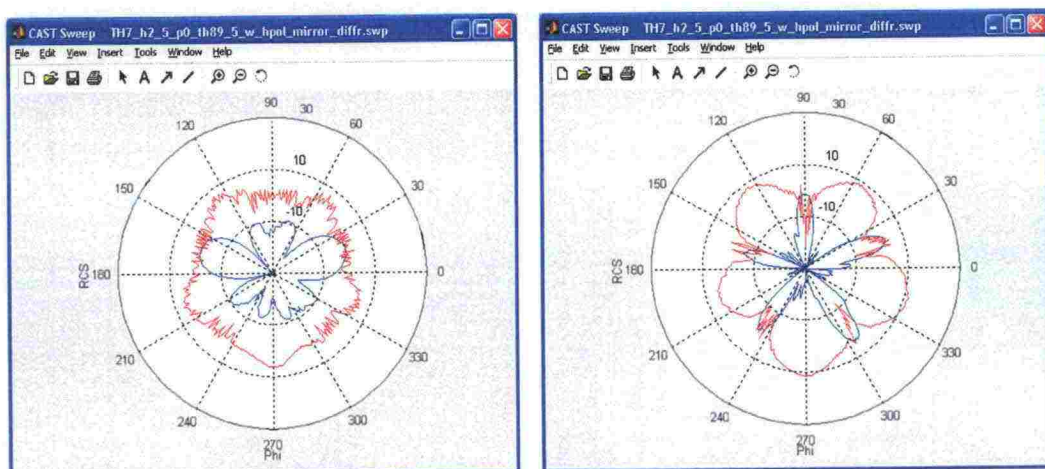
### 3.3.7 Tutkaheijastin 7 - styroksipäällysteinen



Kuva 29. Tutkaheijastin TH7 (halkaisija 14 cm, korkeus 77 cm, poikkipinta-ala 1078 cm<sup>2</sup>).

Soppiryhmää tukevaa styroksia ei ole mallinnettu, koska styroksin sähkömagneettiset ominaisuudet ovat hyvin lähellä ilmaa. Heijastimen mekaanista poikkipintaa vastaavan suoran metallilevyn tutkapoikkipinnat ovat 11.7 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 21.2 dBm<sup>2</sup> (9 GHz).

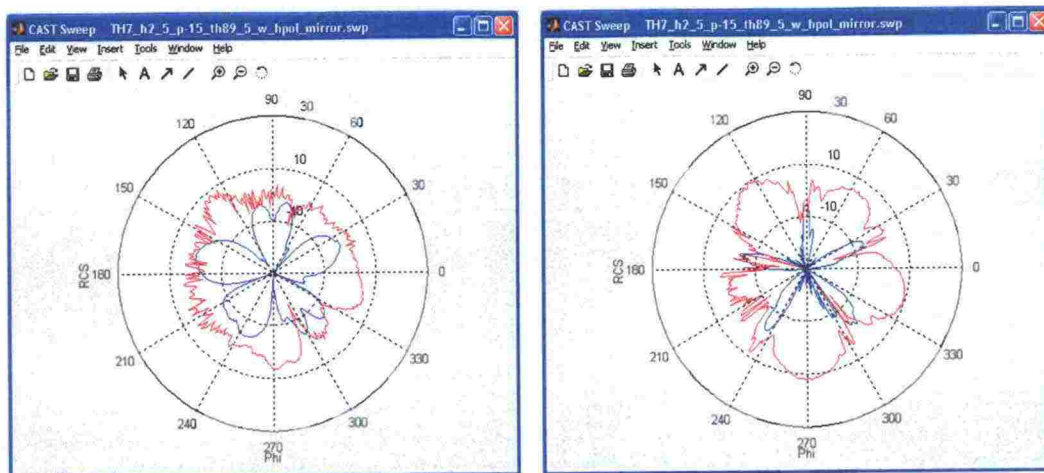
#### Sirontakuviot



Kuva 30. Vaakapyyhkäisy tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa pystyasennossa.

Sirontakuvio ei ole symmetrinen, koska soppielementtien asemointi ei ole symmetrinen. 3 GHz taajuudella sirontakuviossa tehotasovaihtelut ovat pieniä. 9 GHz taajuudella sirontakuvioon ilmestyy matalatehoisia alueita.





Kuva 31. Vaakapyyhkäisy tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa kallistettuna 15° eteenpäin.

Kallistumisen seurauksen sirontakuvio menettää muotonsa molemmilla taajuuksilla. Etenkin 9 GHz taajuudella syntyy matalatehoisia alueita etenkin takasektoriin.

#### Yhteenveto keskeisimmistä laskennoista

Keskeisimmät laskentatulokset on koottu taulukkoon 9. Korkeudella 2.5 m vaakatason tutkapoikkipinnan keskimääräinen vaihtelu on n. 2.6 dB (3 GHz) ja 5.9 dB (9 GHz), kun heijastin on pystyssä. Minimejä esiintyy etenkin 9 GHz:llä. Maksimin suuruus on 7.7 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 11.7 dBm<sup>2</sup> (9 GHz). Pystyssä olevan heijastimen nostaminen 2.5 metristä 4 metriin pienentää heijastusta n. 4.7 dB 3 GHz:llä ja kasvattaa sitä n. 3.6 dB 9 GHz:llä. Kallistaminen kasvattaa keskihajontaa.

Taulukko 9. Yhteenveto TH7:n laskentatuloksista.

	3 GHz				9 GHz			
	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max
Korkeus=2.5m, kallistus=0	1.7	2.6	-5.5	7.7	2.9	5.9	-22.0	11.7
Korkeus=4m, kallistus=0	-3.0	3.7	-17.1	4.0	6.5	5.5	-17.1	14.9
Korkeus=2.5m, kallistus=15	0.0	4.1	-25.3	8.6	1.2	6.4	-30.3	10.9
Korkeus=2.5m, kallistus=-15	0.9	3.5	-16.6	8.7	1.6	6.8	-32.9	12.1

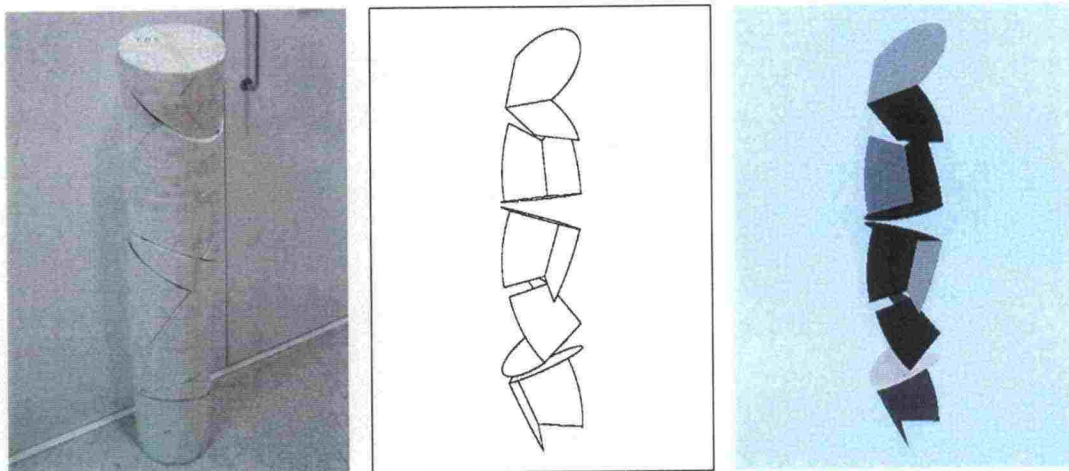
#### Huomioita yksittäisistä laskennoista

Kommentit liittyvät TH7\_kuvat.ppt-tiedostoon ja suluissa on esitetty huomioon liittyvä(t) sivu(t). Huomiot koskevat vaakapolarisaatiokomponenttia.

- (2-3): Sirontakuvio on säännöllinen. 9 GHz taajuudella sirontakuvio keiloittuu. Tehotaso on vaatimaton.
- (4-5): 3 GHz:llä sirontakuvio on pahasti liuskoittunut. Heijastin on herkkä kallistuskulman muutoksille. 9 GHz:llä sirontakuvio on parempi. Vierekkäiset keilat ovat yhdistyneet ja kulma-alueilla 75° - 105° ja 255° - 285° keilan tehotaso säilyy hyvin. Kokonaisteho on edelleen varsin alhainen.

- (6-9): Vedenpinta nostaa tehotasoa ja aiheuttaa rippeliä. Korkeuden nostaminen muuttaa keilan tehotasoa  $270^\circ$  suuntaan 9 GHz taajuudella. Asennuskorkeuden nostaminen pienentää tehotasoa 3 GHz:llä ja kasvattaa 9 GHz:llä.
- (10-13): Kallistuksen johdosta sirontakuvioon ilmaantuu minimikohtia 3 GHz taajuudella etenkin takasektoriin. 9 GHz taajuudella sirontakuvio säilyttää muotonsa.
- (14-15): Diffraction huomiointi ei vaikuta merkittävästi sirontakuvioon.

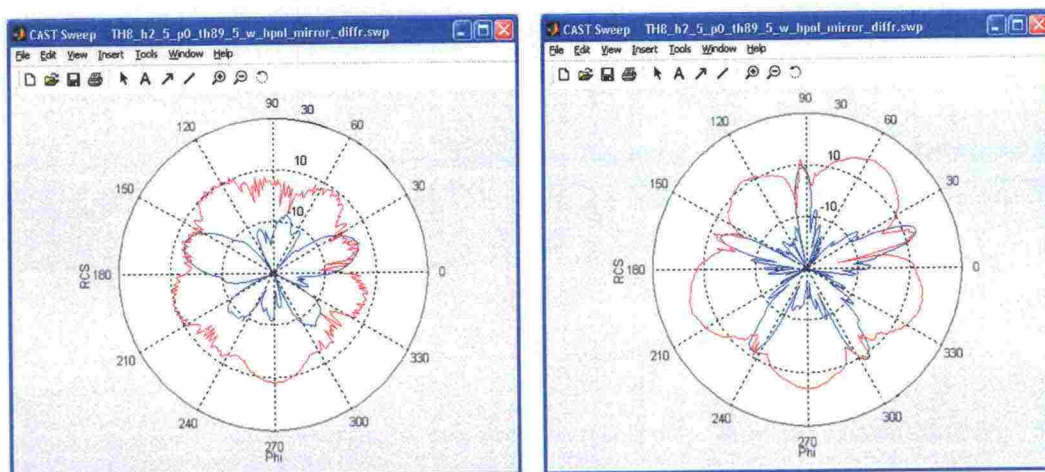
### 3.3.8 Tutkaheijastin 8 - styroksipäällysteinen



Kuva 32. Tutkaheijastin TH8 (halkaisija 20 cm, korkeus 113 cm, poikkipinta-ala 1078 cm<sup>2</sup>).

Soppiryhmää tukevaa styroksia ei ole mallinnettu, koska styroksin sähkömagneettiset ominaisuudet ovat hyvin lähellä ilmaa. Heijastimen mekaanista poikkipintaa vastaavan suoran metallilevyn tutkapoikkipinnat ovat 18.1 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 27.6 dBm<sup>2</sup> (9 GHz).

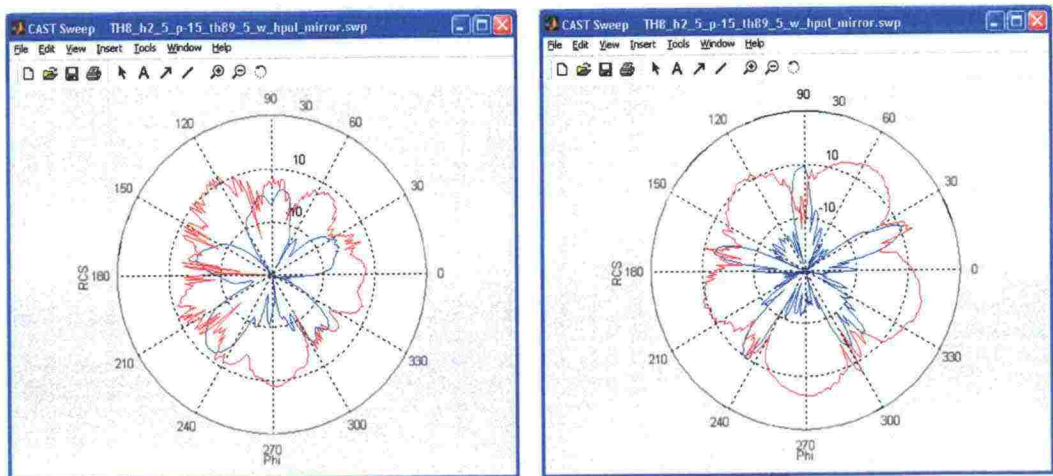
#### Sirontakuviot



Kuva 33. Vaakapyyhkäisy tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa pystyasennossa.

Pystyasennossa heijastimen sirontakuviot on epäsymmetrinen 3 GHz taajuudella, mutta muoto paranee 9 GHz taajuudella. Säteilykuviossa on isoja tasovaihteluja etenkin 9 GHz taajuudella.





Kuva 34. Vaakapyyhkäisy tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa kallistettuna 15° eteenpäin.

Tutkaheijastin säilyttää varsin hyvin muotonsa. 3 GHz taajuudella säteilykuviossa näkyy selvästi kallistuksen vaikutus. Takasektorin suuntaan syntyy erittäin voimakas minimikohta. Samaa ongelmaa ei 9 GHz taajuudella ole.

#### Yhteenveto keskeisimmistä laskelmista

Keskeisimmät laskentatulokset on koottu taulukkoon 10. Vaakatason tutkapoikkipinnan keskimääräinen vaihtelu on n. 4.0 dB (3 GHz) ja 5.2 dB (9 GHz), kun heijastin on pystyssä 2.5 m korkeudella vedenpinnasta. Maksimin suuruus on 11.7 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 19.1 dBm<sup>2</sup> (9 GHz). Pystyssä olevan heijastimen nostaminen 2.5 metristä 4 metriin pienentää heijastusta n. 2.1 dB 3 GHz:llä ja n. 0.4 dB 9 GHz:llä. Kallistaminen kasvattaa keskihajontaa 1.1-1.2 dB 3 GHz:llä ja 0.6 dB 9 GHz:llä.

Taulukko 10. Yhteenveto TH8:n laskentatuloksista.

	3 GHz				9 GHz			
	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max
Korkeus=2.5m, kallistus=0	5.3	4.0	-12.2	11.7	10.6	5.2	-17.8	19.1
Korkeus=4m, kallistus=0	3.2	3.8	-11.6	9.4	10.2	7.1	-16.2	20.6
Korkeus=2.5m, kallistus=15	2.9	5.2	-19.1	11.8	9.2	5.8	-14.5	19.7
Korkeus=2.5m, kallistus=-15	3.7	5.1	-27.4	13.5	8.9	5.8	-13.5	17.3

#### Huomioita yksittäisistä laskennoista

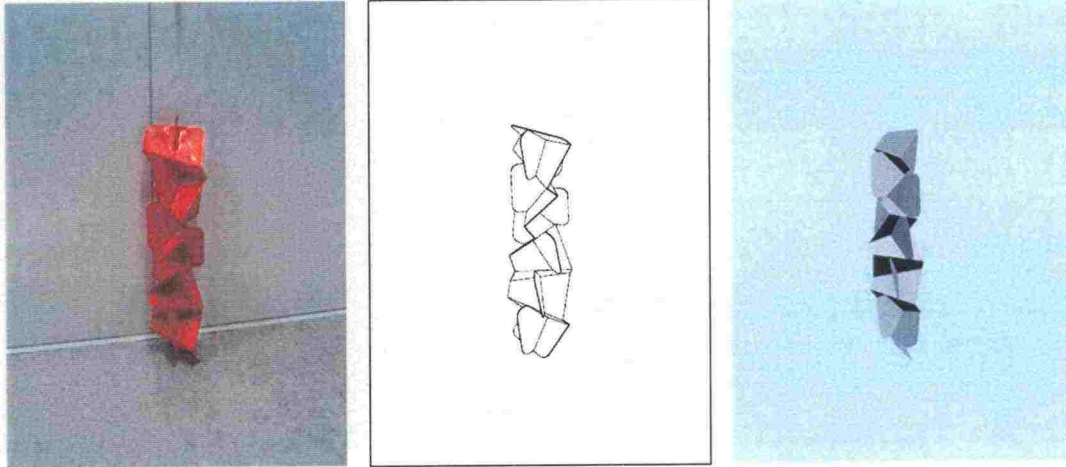
Kommentit liittyvät TH8\_kuvat.ppt-tiedostoon ja suluissa on esitetty huomioon liittyvä(t) sivu(t). Huomiot koskevat vaakapolarisaatiokomponenttia.

- (2-3): Sirontakuvio on säännöllinen. Yleisesti ottaen tehotaso on tyydyttävä. 9 GHz:llä sirontakuvio keiloittuu.
- (4-5): 3 GHz:llä sirontakuvio pahasti liuskoittunut. 9 GHz:llä sirontakuvio on parempi. Vierekkäiset keilat ovat yhdistyneet ja kulma-alueilla 75° - 105° ja 255° - 285°

keilan tehotaso säilyy hyvin eikä pahoja minimikohtia esiinny. Kokonaisteho on edelleen tyydyttävä.

- (6-9): Vedenpinta nostaa tehotasoa ja aiheuttaa rippeliä. Asennuskorkeuden nostaminen aiheuttaa keilojen välille tasoeroja. Kokonaisuudessaan korkeuden nostaminen pienentää tehotasoa 3 GHz:llä ja kasvattaa 9 GHz:llä.
- (10-13): Kallistuksen johdosta sirontakuviin ilmaantuu 3 GHz taajuudella rippeliä takasektoriin. Heijastin säilyttää paremmin tehotasonsa 9 GHz:llä kuin 3 GHz:llä, joskin sirontakuviossa esiintyy tasokuoppia.
- (14-15): Diffraaktion huomiointi ei vaikuta merkittävästi sirontakuviin.

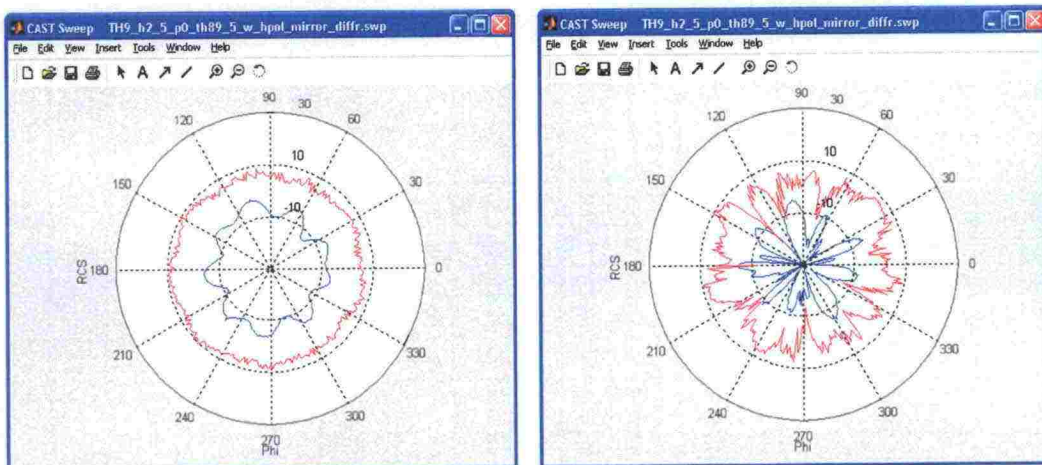
### 3.3.9 Tutkaheijastin 9



Kuva 35. Tutkaheijastin TH9 (halkaisija 14 cm, korkeus 57 cm, poikkipinta-ala 798 cm<sup>2</sup>).

Heijastin koostuu epäsymmetrisistä soppielementeistä ja sen korkeus on merkittävästi leveyttä suurempi. Soppielementit on asemoitu siten, että ne kiertävät soppiryhmän keskiakselin. Heijastimen mekaanista poikkipintaa vastaavan suoran metallilevyn tutkapoikkipinnat ovat 9.0 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 18.6 dBm<sup>2</sup> (9 GHz).

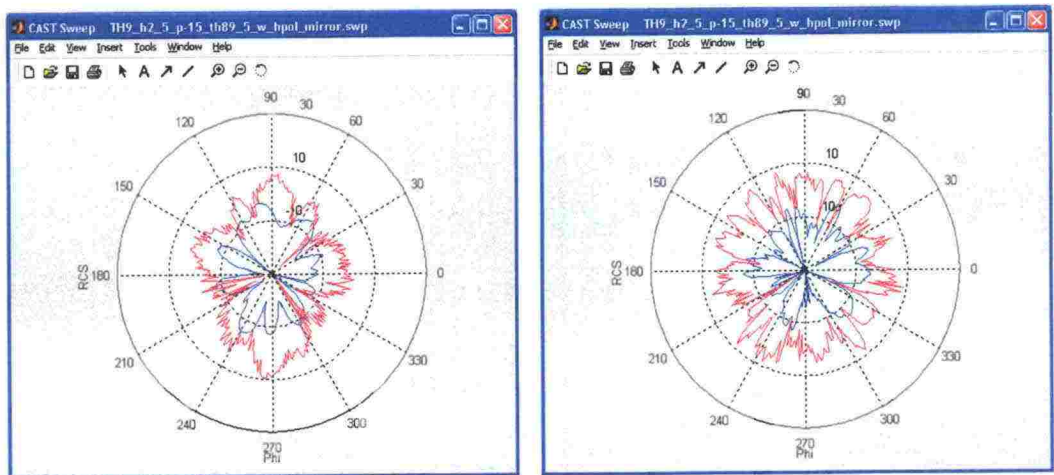
#### Sirontakuviot



Kuva 36. Vaakapyyhkäisyn tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa pystyasennossa.

3 GHz taajuudella heijastimen sirontakuviossa on vähän tehotason vaihteluita. 9 GHz taajuudella sirontakuviioon ilmaantuu laajoja matalatehoisia alueita.





Kuva 37. Vaakapyyhkäisy tulokset 3 ja 9 GHz taajuuksilla tutkaheijastimen ollessa kallistettuna 15° eteenpäin.

Kallistuksen seurauksena sirontakuvio liuskoittuu etenkin 3 GHz taajuudella. Sirontakuviossa esiintyy hyvin matalatehoisia sektoreita sekä voimakkaita minimikohtia. Tilanne paranee selvästi 9 GHz taajuudella.

#### Yhteenveto keskeisimmistä laskelmista

Keskeisimmät laskentatulokset on koottu taulukkoon 11. Vaakatason tutkapoikkipinnan keskimääräinen vaihtelu on n. 1.5 dB (3 GHz) ja 4.7 dB (9 GHz), kun heijastin on pystyssä 2.5 m korkeudella vedenpinnasta. Maksimin suuruus on 10.4 dBm<sup>2</sup> (3 GHz) ja 10.3 dBm<sup>2</sup> (9 GHz). Pystyssä olevan heijastimen nostaminen 2.5 metristä 4 metriin pienentää heijastusta n. 7.4 dB 3 GHz:llä ja n. 3.2 dB 9 GHz:llä. Kallistaminen kasvattaa keskihajontaa etenkin 3 GHz:llä.

Taulukko 11. Yhteenveto TH9:n laskentatuloksista.

	3 GHz				9 GHz			
	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max	Keskiarvo	Hajonta	Min	Max
Korkeus=2.5m, kallistus=0	6.8	1.5	3.0	10.4	2.2	4.7	-17.2	10.3
Korkeus=4m, kallistus=0	-0.6	1.5	-3.9	3.0	-1.0	4.0	-17.4	4.9
Korkeus=2.5m, kallistus=15	-3.2	6.1	-27.5	9.7	1.0	4.7	-29.5	8.5
Korkeus=2.5m, kallistus=-15	-3.2	6.1	-34.2	9.6	0.2	5.1	-28.1	8.5

#### Huomioita yksittäisistä laskennoista

Kommentit liittyvät TH9\_kuvat.ppt-tiedostoon ja suluissa on esitetty huomioon liittyvä(t) sivu(t). Huomiot koskevat vaakapolarisaatiokomponenttia.

- (2-3): Sirontakuvio on säännöllinen 3 GHz:llä, mutta epäsymmetrisyys kasvaa 9 GHz:llä. Sirontakuvioon ilmiantuu heikkoja alueita. Tehotaso pysyy tyydyttävänä molemmilla taajuuksilla.
- (4-5): 3 GHz taajuudella esiintyy voimakasta liuskoittumista. Taajuuden kasvattaminen parantaa heijastimen ominaisuuksia kulma-alueilla 75° - 105° ja 255° - 285°.

- (6-9): Vedenpinta nostaa tehotasoa ja aiheuttaa rippeliä. 9 GHz taajudella esiintyy minimikohtia. Asennuskorkeuden muuttaminen ei vaikuta säteilykuvion muotoon, mutta se pienentää tehotasoa molemmilla taajuuksilla.
- (10-13): Kallistuksen tapauksessa taka- ja etusektorin säteilykuvio säilyy symmetrisenä. Heijastin sietää kallistumista paremmin 9 GHz kuin 3 GHz alueella.
- (14-15): Diffraction huomiointi ei vaikuta merkittävästi sirontakuvioon.

## 4 Yhteenveto

Tehdyn tutkimuksen perusteella kaikki soppiryhmät toimivat hyvin pystyasennossa. Soppiryhmien takaisinsironnassa on toki eroja, mutta ne selittyvät pääosin soppiryhmien kokoeroista. Kallistuskulmaherkkyyden osalta vaihtelu on suurempaa. Pääsääntönä voidaan todeta, että soppiryhmä on sitä herkempi kallistelulle mitä enemmän soppielementtejä on asetettu päällekkäin. Tämä johtuu siitä, että soppiryhmä alkaa toimia antenniryhmänä, jonka sirontakuvio helposti liuskoittuu ts. sisältää paljon minimikohtia.

Kulma-alue tarkastelu oli tässä tutkimuksessa varsin rajoittunut. Sen pohjalta on vaikea asettaa soppiryhmiä yksiselitteiseen paremmuusjärjestykseen tai tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä soppiryhmien ominaisuuksista eri käyttötilanteissa. Tulokset antavat kuitenkin viitteitä siitä, että kaikilla soppiratkaisuilla esiintyy enemmän tai vähemmän pimeitä alueita. Niiden poistaminen joko soppiryhmän geometriaa, asemointia tai kokoa muuttamalla vaatii lisälaskentoja ja käytännön mittauksia. Laskentojen perusteella näyttää kuitenkin siltä, että soppiryhmä TH3 toimii keskimääräistä paremmin. Halkaisijaltaan pienet soppiryhmät TH7, TH8 ja TH9 toimivat kohtuullisen hyvin niiden yksinkertaiseen rakenteeseen nähden.

Vedenpinnasta tapahtuvan heijastuksen mallintaminen vastaamaan todellista tilannetta on vaikeaa, koska tutkalähde tavallisesti liikkuu ja vedenpinta on elastinen. Heijastusvaikutusta voidaan mallintaa tietyllä tasolla laskemalla heijastuneen ja suoran tasoaallon välisestä matkaerosta vaihe-ero ja huomioimalla sen vaikutus sirontakuvion summauksessa. Projektin puitteissa ei ollut mahdollista tutkia tarkemmin vaihe-eron vaikutusta. Näin ollen vedenpinnasta tapahtuvan heijastuksen tutkiminen rajoittui vain muutama erikoistapaukseen.

Soppielementin terävistä reunoista tapahtuva sironta (diffraktio) ei osoittautunut analyysin kannalta merkittäväksi. Suora takaisinsironta ja heijastus vedenpinnan kautta ovat oleelliset sirontalähteet.

Analyysin aikana havaittiin, että jos soppiryhmien ominaisuuksia halutaan parantaa tai eri ratkaisujen paremmuutta vertailla, olisi tärkeää kehittää yksikäsitteinen mittari tai tunnusluku, joka kuvaisi tutkalähteen sirontatasoa ja kallistuserkkyyttä tietyllä avaruuskulma-alueella. Mittari tai tunnusluku tulisi myös verifioida todellisilla mittauksilla.

Laskennassa ei ole tutkittu valmistustoleranssien vaikutusta, koska jokaista poikkeusta kohden olisi vaadittu oma CAD-malli. Tällöin laskentojen ja mallinnuksen työmäärä olisi kasvanut kohtuuttoman suureksi.

Lopuksi on vielä painotettava, että todellisen kuvan saaminen vaatii mittausten suorittamisen ainakin osalle tutkaheijastimista. Mittaus olisi suositeltavaa tehdä häiriötörmässä ympäristössä, jotta ei-mitattavissa tai ei-toistettavissa olevat tekijät eivät pääsisi vaikuttamaan itse tuloksiin.



## Lähdeluettelo

- [1] <http://www.vtt.fi/tte/tte35/rcs.html>
- [2] Vaskelainen, L., Suuren kolmioelementin RCS fysikaalisen optiikan menetelmällä, VTT Tietotekniikka 1998, 11 s.
- [3] Hujanen, A., Sten, J., Diffraktiomallit RCS-laskennassa – Fysikaalisen diffraktio-teorian testaus, VTT Tietotekniikka 10.8.1999, 30 s.
- [4] Likitalo, J., Merenkulun turvalaitteissa käytettävien tutkaheijastimien tutkiminen, Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu 29.3.1979, 48 s.